

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В.И.УЛЬЯНОВА-ЛЕНИНА**

---

Кафедра физической химии

**ПРАКТИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО  
ФИЗИЧЕСКОЙ И КОЛЛОИДНОЙ ХИМИИ**

Для студентов геологического факультета

Казань  
2003

Манапова Л.З., Зазыбин А.Г.

Практическое руководство к лабораторным работам по физической и коллоидной химии. Для студентов геологического факультета. - Казань: 2003. 61 с.

Научный редактор проф. Соломонов Б.Н.

© Казанский государственный университет, 2003 г.

© Манапова Л.З.,  
Зазыбин А.Г., 2003 г.

Методическое пособие подготовлено совместно с Научно-образовательным центром КГУ «Материалы и технологии XXI века» (REC-007) в рамках ФЦП «Интеграция».

# 1. ХИМИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА.

Ознакомьтесь со следующими теоретическими вопросами:

Скорость химической реакции (средняя, истинная). Графический способ определения средней и истинной скорости реакции. Закон действия масс (основной постулат химической кинетики). Молекулярность реакции. Порядок реакции. Методы определения порядка реакции (метод «проб и ошибок» или «метод подбора уравнений» (аналитический и графический варианты), метод Раковского (по периоду полупревращения), дифференциальный метод Вант-Гоффа). Константа скорости реакции, ее размерность. Вывод кинетических уравнений для необратимых реакций нулевого, первого и второго порядков. Влияние температуры на скорость химической реакции (правило Вант-Гоффа, уравнение Аррениуса). Аналитический и графический способы определения энергии активации. Влияние катализаторов на скорость химической реакции.

Химическая кинетика изучает скорость и механизм протекания химических процессов, а также зависимость их от различных факторов.

## 1.1. Классификация реакций

В химической кинетике реакции разделяются по следующим признакам:

- 1) по числу частиц, участвующих в элементарном акте реакции (молекулярность);
- 2) по числу фаз, участвующих в реакции. Реакции, протекающие на поверхности или у поверхности раздела фаз, называют гетерогенными. Реакции, протекающие в одной фазе – гомогенными;
- 3) по применимости катализаторов: каталитические, автокаталитические и некаталитические;
- 4) по степени сложности (по механизму протекания): обратимые и необратимые; параллельные и последовательные.

В этом руководстве будут рассмотрены только гомогенные необратимые реакции.

## 1.2. Скорость химических реакций

Скорость химической реакции определяется изменением количества вещества в единицу времени в единице объема. Она может быть средней:

$$\varpi = \pm \frac{(n_2 - n_1)}{V \cdot (t_2 - t_1)} = \pm \frac{\Delta n}{V \cdot \Delta t} \quad (1)$$

или мгновенной при  $\Delta t \rightarrow 0$

$$\omega = \pm \frac{dn}{V \cdot dt}, \quad (2)$$

где  $n_1, n_2$  - число молей вещества в объеме  $V$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , соответственно.

При условии постоянства объема выражения (1) и (2) упрощаются:

$$\varpi = \pm \frac{\Delta C}{\Delta t} \quad (3)$$

$$\omega = \pm \frac{dC}{dt} \quad (4)$$

и скорость определяется изменением концентрации реагирующего вещества в единицу времени.

Скорость реакции всегда положительна. Однако при протекании реакции во времени концентрации исходных веществ уменьшаются, а продуктов реакции возрастают (рис.1а). В результате соотношение  $\Delta C / \Delta t$  и производная  $dC / dt$  могут быть положительными или отрицательными в зависимости от того, изучают скорость реакции по изменению концентрации одного из продуктов реакции (знак "+") или одного из исходных веществ (знак "-").

Графический способ определения скорости реакции  $\varpi$  или  $\omega$  показан на рис. 1б. Сама зависимость концентрации от времени называется кинетической кривой.

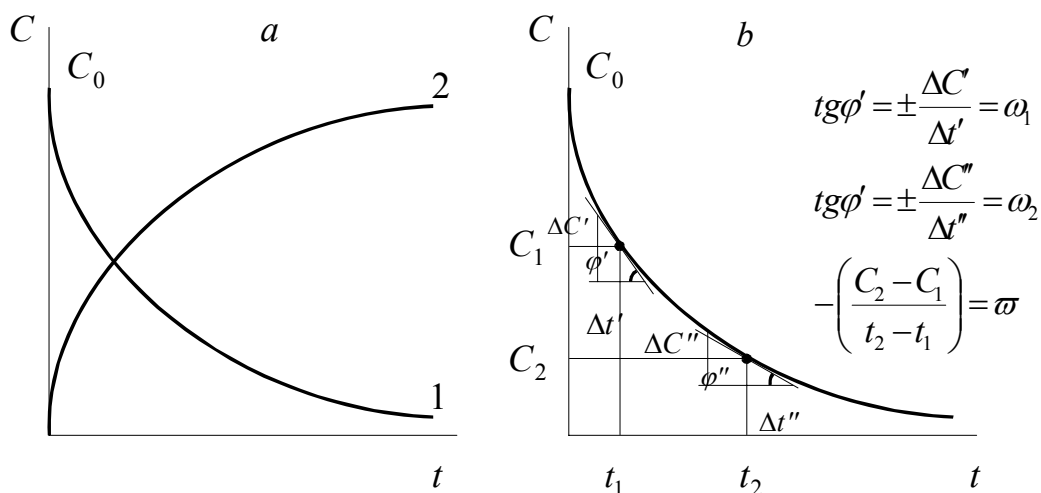


Рис. 1. Кинетические кривые: а - изменение концентрации одного из исходных веществ (1) и одного из продуктов (2) реакции во времени; б - нахождение скорости реакции  $\varpi$  и  $\omega$  по изменению концентрации одного из исходных веществ во времени.

Скорость реакции как производная от концентрации по времени может быть выражена для любого вещества, участвующего в реакции. Например, для реакции, протекающей по уравнению:



где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  - стехиометрические коэффициенты, скорость реакции может быть представлена несколькими выражениями:

$$\omega = -\frac{1}{a} \cdot \frac{dC_A}{dt} = -\frac{1}{b} \cdot \frac{dC_B}{dt} = \frac{1}{c} \cdot \frac{dC_C}{dt} = \frac{1}{d} \cdot \frac{dC_D}{dt} \quad (6)$$

В реакции (5) исходные вещества расходуются, а продукты реакции образуются в эквивалентных количествах (соответственно стехиометрическим коэффициентам), поэтому при определении скорости реакции нет необходимости следить за изменением концентрации всех взаимодействующих веществ. Достаточно знать изменение концентрации во времени одного из веществ, участвующих в реакции согласно уравнению (6).

Скорость реакции зависит от природы реагирующих веществ, их концентрации, присутствия посторонних веществ (например, катализаторов) и их концентрации, среды в которой протекает реакция и условий ее протекания: температуры, давления (для реакций, протекающих в газовой фазе), облучения (фотохимические реакции) и т.д.

Основным законом химической кинетики является постулат, выражающий зависимость скорости реакции от концентрации реагирующих веществ: скорость реакции в каждый момент времени пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ, возведенных в некоторую степень (закон действия масс). Так, для реакции (5) скорость может быть записана:

$$\omega = -\frac{dC}{dt} = k \cdot C_A^\alpha \cdot C_B^\beta \quad (7)$$

где  $dC / dt$  - производная концентрации по времени для веществ А или В (см.урав.6), а  $C_A$  и  $C_B$  - концентрации А и В в момент времени  $t$ , соответственно. Уравнение, связывающее скорость реакции с концентрациями реагирующих веществ, называется кинетическим уравнением.

Коэффициент пропорциональности  $k$  в урав.(7) называется константой скорости реакции. Она равняется скорости реакции при условии если концентрация каждого из реагирующих веществ равна единице, поэтому ее называют также удельной скоростью реакции. Такой физический смысл константы скорости указывает на то, что величина ее должна зависеть от всех факторов, которые влияют на скорость реакции, за исключением концентрации реагирующего вещества. Числовое значение константы зависит также от выбора единиц времени и концентрации. Размерность ее определяется тем кинетическим уравнением по которому производится ее расчет, т.е. зависит от порядка реакции.

Зная константу скорости и порядок реакции по урав.(7) можно определить скорость реакции при любых концентрациях реагирующих веществ. Или используя кинетическое уравнение в интегральной форме (вид уравнения будет зависеть от порядка реакции), можно определить степень превращения вещества за определенное время или решить обратную задачу - задаваясь степенью превращения вещества, определить необходимое время процесса.

Показатели степени при концентрациях в кинетическом уравнении (7)  $\alpha$  и  $\beta$  называются порядком реакции по веществу А и В, соответственно

(или частными порядками). Сумма частных порядков  $\alpha + \beta = m$  называется полным или суммарным порядком реакции.

Различают порядок реакции и ее молекулярность. Молекулярность реакции определяется числом частиц, участвующих в одном элементарном акте химических превращений. При этом число молекул образующихся веществ не имеет значения. В зависимости от этого различают реакции: мономолекулярные, бимолекулярные и тримолекулярные. Одновременное столкновение более трех частиц маловероятно. Даже тримолекулярные реакции достаточно редки.

Порядок реакции является чисто эмпирической величиной. Только для элементарной реакции, протекающей в один этап, он равен ее молекулярности, т.к. стехиометрическое уравнение правильно отражает истинный механизм такой реакции.

Протекание реакции сложным путем, в несколько стадий, является одной из причин расхождения между порядком реакции и ее молекулярностью. Другой причиной расхождения может быть значительный избыток одного из реагентов в реакционной смеси. Тогда концентрация этого реагента остается практически постоянной в ходе реакции, а порядок реакции будет меньше, чем определяемый по стехиометрическому уравнению.

Частные порядки  $\alpha$  или  $\beta$  урав.(7) могут быть равны 0, 1, 2 и 3 и тогда говорят о нулевом, первом и втором или третьем порядке по данному веществу. В общем случае порядок реакции  $m$  может быть любой величиной (0, отрицательной, положительной; целочисленной, дробной).

1.2.1. Реакции нулевого порядка получаются при независимости скорости от концентрации реагирующего вещества. Это встречается, главным образом, среди гетерогенных реакций, протекающих на поверхности или, если концентрация реагирующего вещества поддерживается постоянной. Каталитические реакции также могут иметь первый порядок по катализатору и нулевой по веществу.

Для реакции нулевого порядка скорость может быть записана уравнением:

$$-\frac{dC}{dt} = k \cdot C^0, \text{ или } -\frac{dC}{dt} = k \quad (8)$$

Разделив переменные, после интегрирования получим:

$$\int -dC = \int k \cdot dt \quad -C = k \cdot t + const$$

при  $t = 0, \quad C = C_0 \quad \text{и} \quad const = -C_0$

при  $t > 0, \quad C = C_t$

тогда  $C_0 - C_t = k \cdot t \quad (9) \quad \text{или} \quad k = \frac{C_0 - C_t}{t} \quad (10)$

Из последнего уравнения может быть определена размерность  $k$ . Если концентрация  $C$  в моль/л, а время в секундах, то константа скорости  $k$  в моль  $л^{-1} с^{-1}$ .

Урав.(10) можно записать как

$$t = \frac{C_0}{k} - \frac{C_t}{k}$$

т.е. график в координатах  $C_t - t$  будет линейным, а угол наклона будет зависеть от  $k$ .

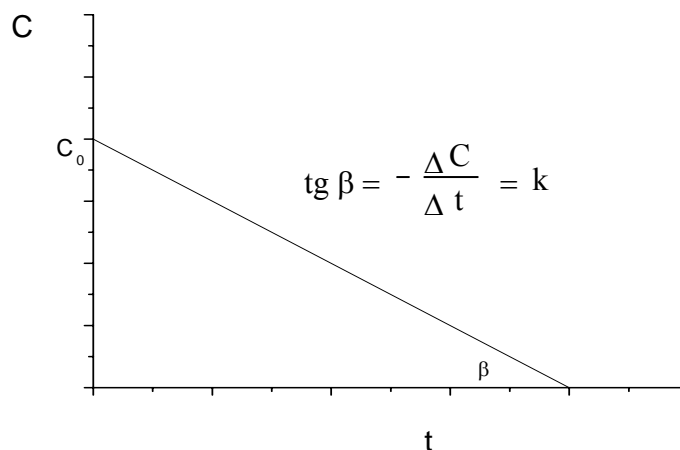


Рис. 2. График зависимости концентрации от времени для реакции нулевого порядка.

Наряду с константой для характеристики химической реакции пользуются величиной периода полураспада (полупревращения)  $t_{1/2}$ , равного промежутку времени, в течение которого прореагирует половина исходного количества вещества. Принимая  $C_t = 0,5 \cdot C_0$  из уравнения (10) получим:

$$t_{1/2} = 0,5 \cdot C_0 / k, \quad (11)$$

т.е. для реакций нулевого порядка время полупревращения прямо пропорционально исходной концентрации.

1.2.2. К реакциям первого порядка относятся реакции изомеризации, термического разложения веществ, радиоактивного распада и многие биомолекулярные реакции при условии, что концентрация одного из реагирующих веществ остается постоянной. Для реакции типа  $A \rightarrow C$  скорость выражается уравнением

$$\omega = k \cdot C \text{ или } -\frac{dC}{dt} = k \cdot C.$$

Разделив переменные,  $-dC/C = k dt$ , после интегрирования получим:

$$-\ln C = k \cdot t + const.$$

При  $t = 0$ ,  $C = C_0$ . Тогда  $const = -\ln C_0$

$$\text{и можно записать } k = \frac{1}{t} \cdot \ln(C_0/C_t) \quad (12)$$

Запишем уравнение (12) в виде:

$$t = \frac{\ln C_0}{k} - \frac{\ln C_t}{k}$$

т.е. график в координатах  $\ln C_t - t$  будет линейным; по углу наклона этого графика можно оценить  $k$ .

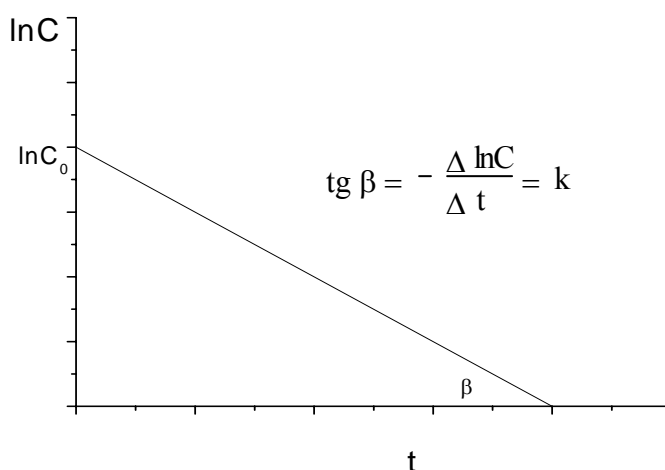


Рис. 3. График зависимости логарифма концентрации от времени для реакции первого порядка.

Размерность константы реакции согласно уравнению (12)  $\text{время}^{-1}$ , а время полупревращения при  $C_t = 0,5 \cdot C_0$ :

$$t_{1/2} = \ln 2 / k. \quad (13)$$

Для реакции первого порядка  $t_{1/2}$  не зависит от концентрации реагирующего вещества.

1.2.3. Примером реакции второго порядка может служить омыление сложного эфира щелочью. Скорости реакций типа  $A + B \rightarrow \text{продукты}$  или  $2A \rightarrow \text{продукты}$ , при условии  $C_{A,0} = C_{B,0}$  могут быть записаны:

$$\omega = k \cdot C^2 \text{ или } -dC/dt = k \cdot C^2$$

После разделения переменных и интегрирования получается уравнение:

$$1/C = k \cdot t + const$$

Значение  $const$  интегрирования получают при  $t = 0$  и  $C = C_0$



тогда:

$$k = \frac{1}{t} \left( \frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_0} \right) \quad (14)$$

Уравнение (14) преобразуем:

$$t = \frac{1}{k C_t} - \frac{1}{k C_0}$$

т.е. график в координатах  $1/C_t - t$  будет линейным; по углу наклона этого графика можно оценить  $k$ .

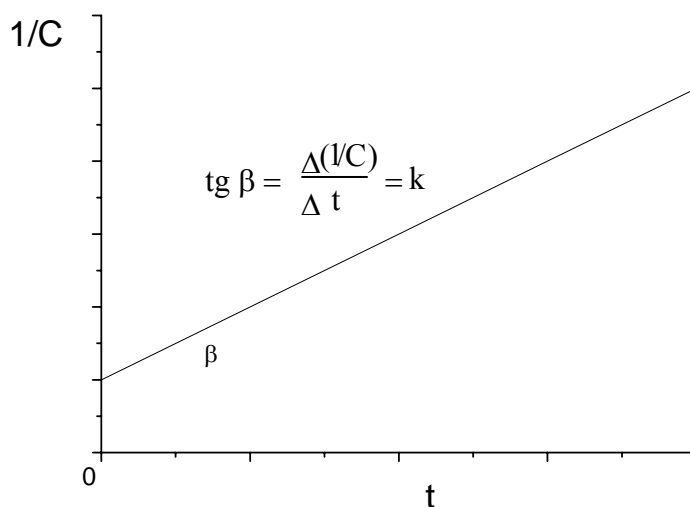


Рис. 4. График зависимости обратной концентрации от времени для реакции второго порядка.

Размерность константы скорости будет концентрация<sup>-1</sup> время<sup>-1</sup>, а период полупревращения:

$$t_{1/2} = \frac{1}{k C_0} \quad (15)$$

Для реакций второго порядка  $t_{1/2}$  обратно пропорционально начальной концентрации вещества.

1.2.4. Реакции третьего порядка могут быть описаны схемой:  $A+B+C \rightarrow$  продукты или  $2A+B \rightarrow$  продукты,  $3A \rightarrow$  продукты и т.д.

При условии  $C_{A,0}=C_{B,0}=C_{C,0}$  скорость реакции может быть записана:  $\omega = k C^3$  или  $-dC/dt = k \cdot C^3$ . После разделения переменных и интегрирования получим:

$$\frac{1}{2 \cdot C^2} = k \cdot t + const$$

при  $t = 0$  и  $C = C_0$ ,  $const = 1/2 \cdot C_0^2$

и тогда

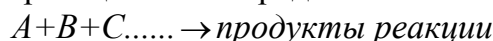
$$k = \frac{1}{2t} \left( \frac{1}{C_t^2} - \frac{1}{C_0^2} \right) \quad (16)$$

$k$  = [концентрация<sup>-2</sup> время<sup>-1</sup>], а время полупревращения

$$t_{1/2} = \frac{3}{k \cdot C_0^2 \cdot 2} \quad (17)$$

Т.е. для реакций третьего порядка  $t_{1/2}$  обратно пропорционально квадрату начальной концентрации.

1.2.5. В случае реакций  $n$ -го порядка



при  $C_{A,0}=C_{B,0}+\dots=C$  скорость реакций равна  $-\frac{dC}{dt} = k \cdot C^n$

После разделения переменных и интегрирования получается:

$$k = \frac{1}{t \cdot (n-1)} \left( \frac{1}{C_t^{(n-1)}} - \frac{1}{C_0^{(n-1)}} \right) \quad (18)$$

и если  $C_t = C_0 / 2$ , то время полупревращения

$$t_{1/2} = \frac{(2^{(n-1)} - 1)}{k(n-1) \cdot C_0^{(n-1)}} \quad (19)$$

Уравнения (18) и (19) не выполняются для реакций первого порядка.

Таким образом, чтобы вычислить величину константы скорости химической реакции, необходимо определить порядок реакции.

### 1.3. Методы определения порядка реакции

Для определения порядка реакции необходимо иметь данные об изменении концентрации реагирующих веществ во времени (т.е. иметь кинетическую кривую).

1.3.1. Метод «подбора уравнений» или метод «проб и ошибок» основан на подстановке экспериментальных данных по концентрации веществ для каждого момента времени (из кинетической кривой) в кинетические уравнения реакций различных порядков. Определяемый порядок реакции соответствует тому уравнению, для которого в различные моменты времени при заданной температуре константа скорости реакции  $k$  будет оставаться постоянной величиной (аналитический метод).

Графический метод основан на том, что определяют такую функцию от концентрации, которая на графике зависимости ее от времени дает прямую линию. В соответствии с кинетическими уравнениями (10), (12), (14), (16) такими функциями являются: для реакции нулевого порядка -  $C_t$ ; реакций первого порядка -  $\ln C_t$ ; реакций второго порядка -  $1/C_t$ .

1.3.2. Метод Раковского. В данном методе изучают зависимость периода полупревращения от  $C_0$ . Для реакций первого порядка (урав.13)  $t_{1/2}$  не зависит от начальной концентрации вещества.

Для реакции n-го порядка уравнение (19) может быть записано:

$$t_{1/2} = k_1 / C_0^{(n-1)}, \quad (20)$$

где  $k_1 = \frac{2^{(n-1)} - 1}{k \cdot (n-1)}$  и после логарифмирования получим

$$\lg t_{1/2} = \lg k_1 - (n-1) \cdot \lg C_0 \quad (21)$$

Зависимость  $\lg t_{1/2}$  от  $\lg C_0$  представляет прямую линию, тангенс угла наклона которой равен (n-1).

Зависимость  $\lg t_{1/2}$  от  $\lg C_0$  может быть построена на основании кинетической кривой одного опыта, как показано на рис.5

Рис.5. Определение порядка реакции по периоду полупревращения:

а- определение  $t_{1/2,i}$  и  $C_{0,i}$  по кинетической кривой,

б - определение порядка реакции.

Этот метод называют иногда методом Раковского.

1.3.3. Дифференциальный метод Вант-Гоффа. Метод основан на использовании уравнения для скорости реакции в дифференциальной форме. Так графический вариант метода Вант-Гоффа основан на использовании уравнения  $\omega = k \cdot C^n$ , после логарифмирования которого получают:

$$\lg \omega = \lg k + n \cdot \lg C \quad (22)$$

На графике в координатах  $\lg \omega - \lg C$  полученная зависимость изображается прямой линией с тангенсом угла наклона к оси  $\lg C$ , соответствующим порядку реакции ( $\tan \varphi = n$ ). Скорость  $\omega$  определяется тангенсом угла наклона касательной к кривой  $C = f(t)$  относительно оси времени как показано на рис.6.

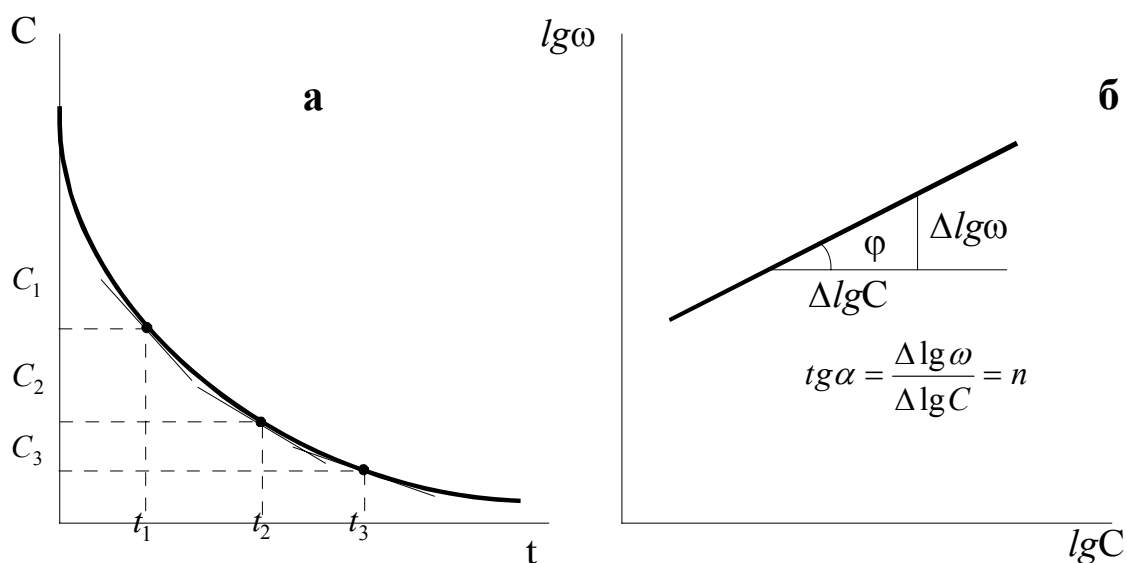


Рис.6. Определение порядка реакции по методу Вант-Гоффа:  
а- определение скорости реакции в различные моменты времени,  
б- определение порядка реакции.

Если в реакции участвуют несколько веществ, то пользуются методом изолирования Оствальда. Так для реакции  $A+B+C \rightarrow \text{продукты}$  кинетическое уравнение может быть записано:

$$-\frac{dC}{dt} = k \cdot C_A^\alpha \cdot C_B^\beta \cdot C_C^\gamma \quad (23)$$

Сначала проводят реакцию с большим избытком веществ В и С (в 10-100 раз больше, чем концентрация А). Тогда уравнение (23) может быть записано:

$$-\frac{dC}{dt} = k' \cdot C_A^\alpha \quad (24)$$

где  $k' = k \cdot C_B^\beta \cdot C_C^\gamma$ . При таких условиях определяют  $\alpha$  одним из изложенных выше методов. Во втором опыте берут в избытке А и С и определяют  $\beta$  и т.д.

#### 1.4. Зависимость скорости реакции от температуры.

Скорость химических реакций с повышением температуры резко возрастает. Эта зависимость для гомогенной реакции приближенно описывается эмпирическим правилом Вант-Гоффа: при нагревании на  $10^0$  константа скорости увеличивается в два-четыре раза:

$$\gamma = \frac{k_{t+10}}{k_t} = 2 \div 4 \quad (25)$$

где  $\gamma$  - температурный коэффициент,  $k_{t+10}$  и  $k_t$  константы скорости реакции при температуре  $t + 10$  и  $t$ , соответственно.

Определив  $\gamma$ , можно приближенно рассчитывать константу скорости в небольшом интервале относительно невысоких температур по уравнению:

$$k_{t_2} = k_{t_1} \cdot \gamma^{(t_2 - t_1)/10} \quad (26)$$

Более точная зависимость скорости реакции от температуры ( $T$ ) описывается уравнением Аррениуса

$$k = A \exp(-E / RT) \text{ или } \ln k = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (27)$$

где  $k$  - константа скорости реакции,  $A$  - эмпирическая постоянная, называемая предэкспоненциальным множителем и численно равная константе скорости при  $T \rightarrow \infty$ ,  $E$  - эмпирическая постоянная, имеющая размерность энергии (энергия активации),  $T$  - термодинамическая температура,  $R$  - универсальная газовая постоянная.

Энергией активации реакции согласно теории соударений называется минимальная энергия (в расчете на 1 моль), которой должны обладать реагирующие частицы, чтобы столкновение между ними привело к взаимодействию. Частицы, энергия которых больше или равна  $E$ , называются активными. Эта энергия необходима для преодоления энергетического барьера реакции. Столкновение будет эффективным, если суммарная энергия сталкивающихся частиц равна или больше энергии активации  $E$ , характерной для данной реакции. Для сложной реакции (протекающей в несколько стадий) параметр  $E$  в уравнении Аррениуса не равен энергии активации лимитирующей стадии, а представляет некоторую функцию энергий активации отдельных стадий или вообще эмпирическую величину.

Самый простой способ определения энергии активации  $E$  использование уравнения Аррениуса (27) при температурах  $T_1$  и  $T_2$ , что дает:

$$\ln \frac{k_{T2}}{k_{T1}} = \frac{E}{R} \cdot \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2} \right) \quad (28)$$

отсюда - возможность расчета  $E$  по константам скоростей при двух температурах.

Меньшую ошибку в значении  $E$  получают при построении графической зависимости  $\ln k$  от  $1/T$ , соответствующей уравнению (27), когда известен ряд констант скоростей при различных температурах.

### *1.5 Влияние катализатора на скорость химической реакции*

Катализатором называют вещество, которое не расходуется в реакции, но меняет ее скорость. Изменение скорости реакции под воздействием катализатора называется явлением катализа. Если катализатор составляет одну фазу с реагирующим веществом, говорят о гомогенном катализе. В случае гетерогенного катализа реакция протекает на границе фаз между катализатором и реагирующими веществами. Функция катализатора

закключается в снижении энергии активации процесса. Катализатор в равной мере увеличивает (уменьшает) скорость прямой и обратной реакции и на положение равновесия (величину константы равновесия) не влияет.

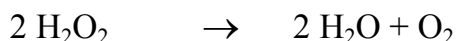
В гомогенных каталитических реакциях скорость пропорциональна количеству катализатора. Механизм действия катализатора обычно заключается в образовании промежуточных соединений с одним из участвующих в реакции веществ. Далее это промежуточное соединение реагирует с образованием конечных продуктов и свободного катализатора. Если энергия активации каждой из стадий меньше энергии активации реакции, идущей без катализатора, то процесс ускоряется.

В гетерогенном катализе катализатор и реагирующие вещества находятся в разных агрегатных состояниях. Наиболее часто катализатор представляет собой твердое вещество, а участники реакции являются газами или жидкостями. Реакция протекает на поверхности катализатора, и, следовательно, свойства поверхности (величина площади, химический состав поверхностного слоя, его структура) играют важную роль для активности катализатора. Действие катализатора связано с адсорбцией реагирующих веществ (или некоторых из них) на поверхности катализатора, в результате чего, либо образуются нестойкие поверхностные соединения, либо «разрыхляются» связи в адсорбированной молекуле. Адсорбированные молекулы далее вступают в реакцию, которая характеризуется меньшей величиной энергии активации, чем некаталитическая реакция.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### **Работа 1. Изучение скорости разложения перекиси водорода газометрическим методом**

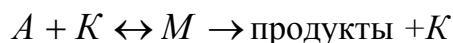
Распад  $\text{H}_2\text{O}_2$  в водных растворах при обычных температурах идет довольно медленно:



Увеличение скорости происходит под влиянием различных веществ. Гомогенный катализ реализуется, например, в присутствии ионов  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ . Реакция гетерогенного катализа идет при добавлении твердых веществ: металлов ( $\text{Pt}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ni}$  и др.), оксидов ( $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др.).

**Цель работы** - изучение кинетики реакции каталитического распада перекиси водорода в присутствии  $\text{FeCl}_3$ .

Катализ разложения  $\text{H}_2\text{O}_2$  хлорным железом происходит по общей схеме:



где А - перекись водорода, К - катализатор.

Равновесие устанавливается быстро, и скорость определяющей стадией является распад М.

Порядок по концентрации  $\text{H}_2\text{O}_2$  первый (или близко к первому) и для расчета константы скорости используют урав.(12).

Начальная и текущая концентрации  $\text{H}_2\text{O}_2$  пропорциональны объемам кислорода, выделившегося к концу реакции  $V_\infty$  и разности между  $V_\infty$  и текущим объемом кислорода  $V_t$ . Тогда для расчета константы скорости реакции урав.(12) будет иметь вид:

$$k = (1/t) \cdot \ln(V_\infty / (V_\infty - V_t)).$$

### **Выполнение работы**

Для изучения скорости разложения перекиси водорода применяют установку, показанную на рис.7, которая позволяет измерять объем выделяющегося кислорода.

В одно колено реактора 1 (рис.7) с помощью пипетки помещают 10 мл 3% раствора перекиси водорода, а во второе - 0.5, 1 или 1.5 мл (по указанию преподавателя) раствора хлорного железа и с помощью пробки 2 соединяют реакционный сосуд с мерной бюреткой.

Перед началом эксперимента проверяют герметичность системы. Для этого приводят давление внутри системы к атмосферному:

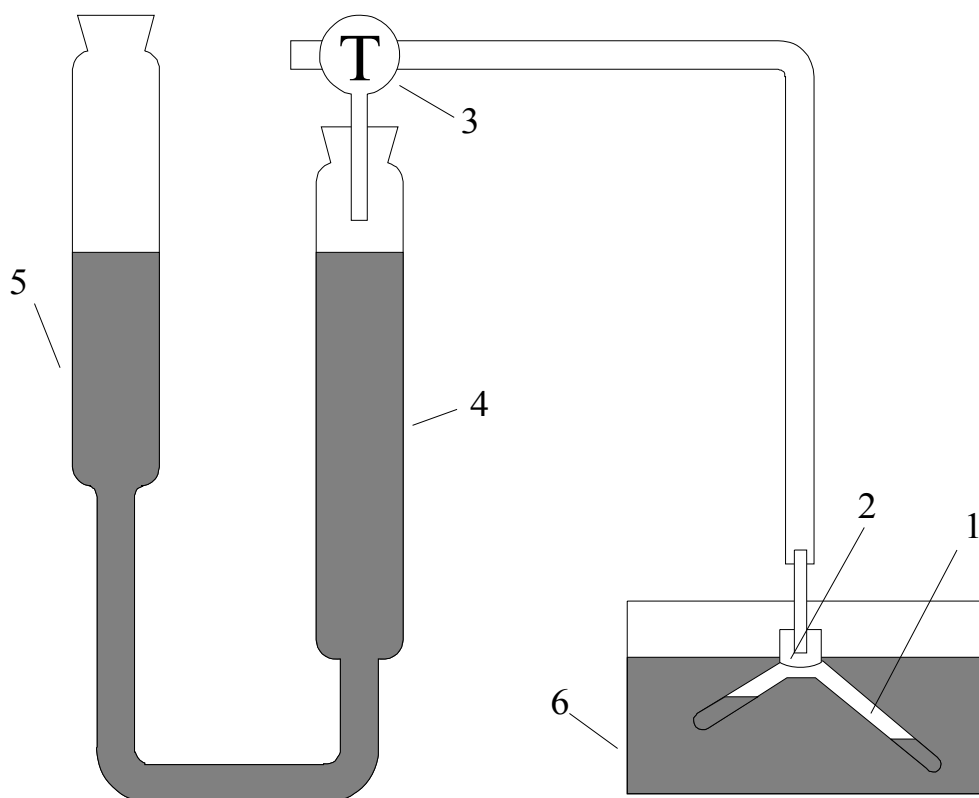


Рис. 7. Схема установки для изучения скорости разложения перекиси водорода:

1 - реакционный сосуд, 2 - пробка, соединяющая реакционный сосуд с мерной бюреткой 4, 3 - трехходовый кран, 5 - уравнильный сосуд, 6 – термостат.

уравняв на произвольной высоте жидкость в бюретке 4 и уравнильном сосуде 5, несколько раз поворачивают кран 3 так, чтобы пространство над жидкостью сообщалось то с реакционным сосудом, то с атмосферой. Соединив бюретку 4 с атмосферой, поднимают уравнильный сосуд 5, чтобы заполнить бюретку жидкостью до нулевой отметки, после чего соединяют бюретку 4 с реактором 1 и опускают сосуд 5 примерно на четверть высоты бюретки. Если обеспечена герметичность, то уровень затворной жидкости в бюретке 4 не должен смещаться в течение 2-3 минут.

После проверки герметичности приступают к выполнению эксперимента. Для этого перекись водорода переливают в колено с катализатором, смесь встряхивают. Время смешения принимают за время начала реакции. Измерения ведут каждую минуту. Уровень жидкости в уравнильном сосуде 5 поддерживают на уровне жидкости в мерной бюретке 4. Измерения заканчивают, если в течение 5-10 мин. объем кислорода не увеличивается.

Если в ходе реакции объем мерной бюретки окажется недостаточным, следует, по возможности быстро, с помощью крана 3 соединить бюретку 4 с



атмосферой. С помощью сосуда 5 установить уровень жидкости в бюретке на нулевой отметке и вновь краном 3 соединить реакционный сосуд 1 с бюреткой 4. Продолжать измерения, прибавляя объем кислорода, выпущенного в атмосферу.

По окончании процесса выделения пузырьков кислорода приступают к определению  $V_{\infty}$ . Для этого реакционный сосуд 1 помещают в водяную баню с температурой воды 70-80<sup>0</sup>С и выдерживают его при этой температуре до тех пор, пока объем выделившегося кислорода не будет изменяться в течение 5-10 минут.

Результаты измерений и расчеты привести в виде табл.1, предварив ее следующими данными:

Объем перекиси водорода	мл
Катализатор и его объем	мл
Температура опыта	<sup>0</sup> С
Объем кислорода по окончании реакции $V_{\infty}$	мл

Таблица 1

Выделение O<sub>2</sub> во времени и определение константы скорости разложения H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

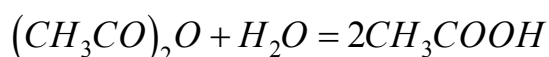
$N$	$t, \text{ мин.}$	$V_t, \text{ мл}$	$V_{\infty} - V_t$	$\ln(V_{\infty} - V_t)$	$k, \text{ мин}^{-1}$
					$\bar{k} =$

По полученным данным построить график зависимости  $\ln(V_{\infty} - V_t) = f(t)$  и определить константу скорости реакции  $k$  (урав.(12), рис.3).

Сделать вывод о величинах  $k$ , полученных аналитическим и графическим методами.

## ***Работа 2. Изучение скорости реакции гидратации уксусного ангидрида.***

Гидролиз уксусного ангидрида протекает по уравнению:



и является бимолекулярной реакцией. Однако в разбавленном водном растворе гидролиз идет как реакция первого порядка и до конца. Молярная концентрация воды в этом случае значительно больше молярной концентрации уксусного ангидрида, поэтому уменьшение концентрации воды в ходе реакции незначительно и концентрация воды может быть принята постоянной. Тогда скорость реакции будет зависеть от концентрации уксусного ангидрида и она может быть отнесена к реакциям псевдопервого порядка.

Наиболее удобным методом изучения кинетики этой реакции является метод измерения электропроводности, не требующий отбора проб для анализа.

Электрическая проводимость системы со временем значительно возрастает вследствие образования уксусной кислоты.

Пренебрегая неполной и меняющейся с концентрацией диссоциацией уксусной кислоты, можно принять в первом приближении, что увеличение электрической проводимости во времени пропорционально концентрации уксусной кислоты. Это грубое допущение, но при расчете константы скорости происходит компенсация ошибок и конечный результат получается удовлетворительным. Количество образующейся уксусной кислоты пропорционально количеству взятого уксусного ангидрида.

Если обозначить удельную электропроводность раствора в момент начала реакции  $\chi_0$ , в момент времени  $t - \chi_t$  и в конце реакции  $\chi_\infty$  (когда она уже не меняется), тогда начальная концентрация уксусного ангидрида  $C_0 = \text{const}(\chi_\infty - \chi_0)$ , а концентрация его в момент времени  $t - C_t = \text{const}(\chi_\infty - \chi_t)$  и уравнение (12) может быть записано:

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{(\chi_\infty - \chi_0)}{(\chi_\infty - \chi_t)}$$

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Измерения электропроводности проводится с помощью кондуктометра ОК-102, позволяющего сразу определять величины удельной электропроводности в сименсах ( $1 \text{ См} = 1 \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ ).

Прежде чем приступить к работе необходимо ознакомиться с работой прибора (стр. 37).

После подготовки кондуктометра к работе в мерную колбу на 25 мл влить 3 мл уксусного ангидрида и довести объем раствора дистиллированной (предварительно термостатированной при температуре, указанной преподавателем) водой до метки.

Приготовленным раствором (после двукратного промывания) заполнить сосуд для измерения электропроводности так, чтобы электроды были полностью погружены в раствор. Время первого измерения принимается за время начала реакции.

Измерение удельной электропроводности проводится тем чаще, чем выше температура опыта (секундомер должен быть включен сразу после смешения ангидрида с водой). Два-три измерения проводятся через 30 с, четыре-пять измерений через 1 мин., два-три измерения через 5 мин., далее делаются измерения через 10 мин., через 1 час и до установления постоянной величины удельной электропроводности.

Полученные результаты заносятся в таблицу и приводятся на рисунках. На рисунке строится зависимость  $\ln(\chi_{\infty} - \chi_0) - t$  и по тангенсу углу наклона находят константу скорости  $k$ .

Таблицу предваряют данными:

Удельная электропроводность в начале реакции,  $\chi_0$  см

Удельная электропроводность в конце реакции,  $\chi_{\infty}$  см

Температура опыта  $^{\circ}\text{C}$

Таблица. 2

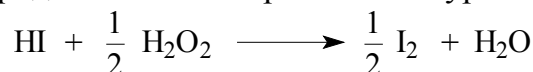
Изменение удельной электропроводности во времени и расчет константы скорости гидролиза уксусного ангидрида.

Время от начала реакции, мин.	$\chi_t$ , см	$(\chi_{\infty} - \chi_t)$	$\ln(\chi_{\infty} - \chi_0)$	$k$ , мин $^{-1}$

В выводах сравнить величины  $k$ , полученные графическими и аналитическими способами.

### ***Работа 3. Определение константы скорости реакции окисления йодоводородной кислоты пероксидом водорода.***

Окисление йодоводородной кислоты протекает по уравнению:

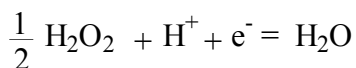
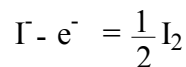


При большом избытке  $\text{H}_2\text{O}_2$  реакция описывается уравнением кинетики первого порядка. В этом случае константу скорости реакции можно рассчитать по уравнению:

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{C_{\text{HI}}^0}{C_{\text{HI}}^t}$$

где  $C_{\text{HI}}^0$  – начальная концентрация HI, а  $C_{\text{HI}}^t$  – концентрация HI в момент времени  $t$ .

Электропроводность исходной смеси HI и  $\text{H}_2\text{O}_2$  обусловлена наличием сильного электролита – HI. По мере протекания реакции электрическая проводимость раствора будет уменьшаться, так как концентрация электролита в растворе убывает:



Поскольку удельная электрическая проводимость  $\chi$  прямо пропорциональна концентрации электролита (НІ):

$$C(\text{HI}) = \frac{\chi \cdot 1000}{\lambda}$$

можно заменить концентрации НІ в уравнении для константы скорости на удельные электропроводности:

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{\chi_0}{\chi_t}$$

где  $\chi_0$  – электропроводность раствора в начальный момент времени, а  $\chi_t$  – электропроводность раствора в момент времени  $t$ .

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Измерения электропроводности проводятся с помощью кондуктометра ОК-2, позволяющего сразу определять величины электропроводности в сименсах ( $1 \text{ См} = 1 \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ ).

Прежде чем приступить к работе, необходимо ознакомиться с работой прибора (стр. 37).

После подготовки кондуктометра к работе, в мерный цилиндр отобрать пипеткой 0.1 мл 57% раствора йодоводородной кислоты, разбавить водой до 50 мл и затем 10 мл получившегося раствора поместить в мерную колбу на 25 мл.

В мерный цилиндр на 10 мл отобрать пипеткой 0,1 мл 30% раствора перекиси водорода и разбавить водой до 10 мл. Добавить раствор перекиси водорода в мерную колбу к раствору йодоводородной кислоты, тщательно перемешать. Время смешения принять за начало отсчета. Содержимое мерной колбы перелить в сосуд для измерения электропроводности, поместить в него электроды. Первое значение электропроводности измерить через 1 минуту после смешения растворов. Дальнейшие измерения проводить каждую минуту. Через 15 минут после начала опыта измерения можно прекратить, так как изменение величин электропроводности будут уже незначительными.

По полученным данным построить график в координатах  $\ln(\chi_t) - t$ , определить графическим путем величину  $\chi_0$ . Константу скорости реакции определить расчетным путем и графическим методом. Полученные и расчетные данные занести в таблицу:

Таблица 3

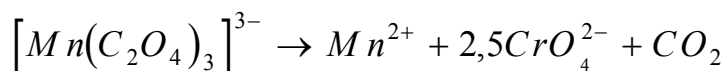
Изменение удельной электропроводности во времени и расчет константы скорости реакции окисления йодоводородной кислоты.

Время от начала реакции, мин	$\chi_t$ , См	$\ln \chi_t$	$k$ , мин <sup>-1</sup>

В выводах сравнить величины  $k$ , полученные графическим и аналитическим методами.

#### ***Работа 4. Фотометрическое изучение скорости разложения комплексного иона триоксалата марганца***

Химические реакции, в результате которых происходит изменение цвета, могут быть изучены фотометрическим методом. Одним из примеров таких реакций может служить распад комплексного иона триоксалата марганца, окрашенного в коричневый цвет, до смеси продуктов, которые бесцветны.



Изучаемая реакция является реакцией первого порядка. Константа скорости реакции может быть вычислена по уравнению (12), которое легко преобразовать к виду:

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{D_0}{D_t}$$

где  $D_0$  и  $D_t$  оптические плотности раствора в начальный момент времени и в момент времени  $t$ , оптическая плотность раствора пропорциональна концентрации оксалата марганца.

С помощью фотоэлектрокалориметра КФО измеряют не оптическую плотность, а коэффициент пропускания -  $\tau$ , который связан с оптической плотностью уравнением:

$$D = -\lg \tau.$$

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

Перед началом работы необходимо ознакомиться с паспортом на фотоэлектрокалориметр КФО.

До включения прибора в сеть необходимо установить минимальную чувствительность его. Для этого ручку "УСТАНОВКА 100" вращать против часовой стрелки до упора. Проверить нулевое положение стрелки измерительного прибора и при необходимости выставить ее на нуль корректором.

Включить прибор в сеть. Измерения могут проводиться через 15 мин. после включения прибора.

Измерение коэффициента пропускания  $\tau$  производится следующим образом:

- 1) при открытой крышке кюветного отделения рукояткой "УСТАНОВКА НУЛЯ" устанавливается ноль на шкале микроамперметра,
- 2) в кюветное отделение помещается кювета с дистиллированной водой и оно закрывается крышкой,

3) закрыв кюветное отделение, ручкой "УСТАНОВКА 100" выставить стрелку измерительного прибора на 100,

4) ручкой "КЮВЕТЫ" сменить кювету с дистиллированной водой на такую же кювету с реакционной смесью и снимать показания прибора во времени  $N_t$ . Коэффициент пропускания  $\tau = N_t/100$ . Измерения проводят через 1, 2, 4, 6, 10 минут и прекращать при  $N_t$  более 80.

Реакционную смесь готовят в следующей последовательности: в фарфоровый стакан емкостью 20 мл наливают 1 мл 0.1М  $MnSO_4$ , 7 мл 0.1М  $H_2C_2O_4$  и 2 мл 0.01М  $KMnO_4$ , одновременно включают секундомер (началом отсчета времени является момент смешения). Этой реакционной смесью заполняют кювету, которую помещают в кюветное отделение КФО.

Результаты измерений и расчеты представляют в таблице и на графике.

Построить график  $\ln D_t - t$  и определить константу скорости реакции  $k$ .

Таблица 4

Изменение коэффициента пропускания во времени и расчет константы скорости реакции разложения оксалата марганца.

$t =$  °C

Время от начала реакции	$N_t$	$\tau = N_t/100$	$D = -\lg \tau$	$\ln D_t$	$k = \frac{1}{t} \ln \frac{D_0}{D_t}$
		$\bar{k}$			

В выводах сравнить  $\bar{k}$  и  $k$ , полученную графическим способом.

## 2. ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ

Ознакомьтесь со следующими теоретическими вопросами:

Понятие о равновесии, правило фаз Гиббса, использование его для анализа диаграмм фазовых равновесий. Понятия: фаза, компонент, число степеней свободы. Диаграмма состояния «температура-состав», построение ее по кривым охлаждения «температура-время», Различные типы диаграмм состояния. Термический анализ. По диаграмме «температура-состав» для двухкомпонентной системы (компоненты полностью растворимы друг в друге в жидком состоянии и полностью нерастворимы друг в друге в твердом состоянии) научитесь определять число степеней свободы в каждой точке диаграммы.

Закономерности, которым подчиняются равновесные гетерогенные системы, устанавливаются правилом фаз, которое было выведено Гиббсом:

$$S = K - \Phi + n, \quad (29)$$

где  $K$  - число компонентов;  $n$  - число внешних параметров, определяющих состояние системы;  $\Phi$  - число фаз, находящихся в равновесии.

Физико-химический анализ основан на изучении зависимости между свойствами системы, ее составом и условиями существования.

Физико-химический анализ широко использует геометрические образы. Графическое изображение зависимости какого-либо свойства от состава системы называется диаграммой состояния.

Термический анализ является частным случаем физико-химического анализа и основан на изучении зависимости температуры от времени при равномерном охлаждении или нагревании системы.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### *Работа 1. Изучение кристаллизации легкоплавких систем*

Органические вещества обладают сравнительно низкими температурами плавления, и для таких систем термический анализ можно проводить с помощью термометра. Системы из органических веществ можно исследовать в обычных пробирках.

### ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Для проведения работы используются смеси нафталина с дифениламином или азобензолом в пропорциях, указанных в таблицах 5, 6.

Таблица 5

Состав смесей нафталин – азобензол и температуры кристаллизации.

№ смеси	Нафталин		Азобензол		Температура крист.	
	содержание, %мольн.	навеска, г.	содержание, %мольн.	навеска, г.	начало, (°C)	конец, (°C)
1	100	5.00	0	0		
2	80	3.69	20	1.31		
3	60	2.57	40	2.43		
4	55	2.31	45	2.63		
5	46.5	1.90	53.5	3.10		
6	40	1.60	60	3.40		
7	35	1.37	65	3.69		
8	20	0.75	80	4.25		
9	0	0	100	5.00		

2. Исследуемые смеси поместить в пробирки, пронумерованные в соответствии с порядковым номером смеси в таблице 5 или 6. Пробирки закрыть резиновыми пробками с вставленными в них термометрами и мешалками.

3. Пробирки со смесями погрузить в водяную баню с помощью специальных держателей. После того, как смесь расплавится, пробирку с расплавом поместить в воздушную баню (стеклянный стаканчик) и приступить к регистрации температуры смеси в течение времени. Для этого через каждые 30 сек. надо записывать показания термометра при непрерывном перемешивании расплава металлической мешалкой. Перемешивание прекратить с началом кристаллизации. Если продолжать перемешивание во время кристаллизации, то выделяющиеся кристаллы вместе с захваченным жидким расплавом размазываются по стенкам пробирки, и термометр может оказаться в воздушном мешке, что приведет к неправильным его показаниям.

4. Запись хода температуры продолжать до полного окончания кристаллизации. Ориентировочно при охлаждении смеси 2 - 8 системы



нафталин-азобензол опыт можно закончить при 40<sup>0</sup>С, а при охлаждении смеси 2 - 6 системы нафталин - дифениламин - при 30<sup>0</sup>С.

Таблица 6

Состав смесей нафталин – дифениламин и температуры кристаллизации.

№ смеси	Нафталин		Дифениламин		Температура крист.	
	содержание, %мольн.	навеска, г.	содержание, %мольн.	навеска, г.	начало, (°С)	конец, (°С)
1	100	5.00	0	0		
2	79.5	3.52	24.1	1.48		
3	55.8	2.44	44.2	2.56		
4	32.45	1.33	67.55	3.67		
5	26.9	1.09	73.1	3.91		
6	6.0	0.23	94.0	4.77		
7	0	0	100	5.00		

5. Результаты измерений температуры при охлаждении расплава различного состава свести в таблицу 7 и по этим данным построить кривые зависимости температуры смеси от времени охлаждения, в масштабе: 30 сек - 1 мм (ось абсцисс), 1°С - 1 мм (ось ординат).

Таблица 7

Изменение температуры смеси во время охлаждения.

Время охлаждения	Температура (°С) смеси состава								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Кривые охлаждения следует расположить так, чтобы их начальные точки отстояли друг от друга на расстоянии в 1 см и кривые охлаждения не пересекались (рис. 8).

6. Температуры начала и конца кристаллизации расплава (могут быть одинаковыми) внести в таблицы 5 и 6.

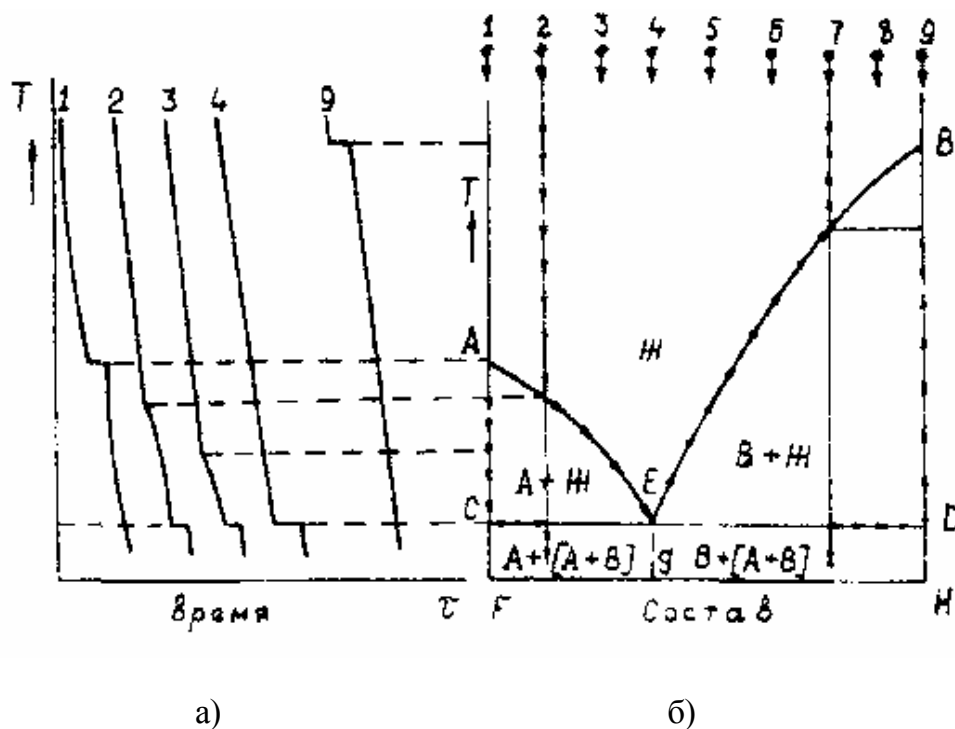


Рис .8. Кривые охлаждения (а) и диаграмма плавкости бинарной системы (б).

7. После этого на кривых охлаждения отметить точки, отвечающие кристаллизации смеси. Это будут горизонтальные или слегка наклонные площадки для процессов кристаллизации чистых веществ или эвтектики и перегибы на кривой в случае кристаллизации других смесей.

8. По полученным данным построить диаграмму состояния системы. По оси абсцисс откладывают состав, по оси ординат – температуру начала кристаллизации (рис. 8б).

### 3. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Ознакомьтесь со следующими теоретическими вопросами:

Проводники первого и второго рода. Растворы электролитов. Сильные и слабые электролиты, примеры. Степень электролитической диссоциации  $\alpha$ . Электропроводность (удельная и эквивалентная). Зависимость удельной и эквивалентной электропроводности от концентрации электролита. Зависимость электропроводности от концентрации и подвижности ионов. Подвижность ионов гидроксония и гидроксила. Влияние температуры на электропроводность. Применение метода электропроводности для аналитических определений (кондуктометрия).

Растворы электролитов являются проводниками второго рода: электрический ток в них переносится ионами, образующимися в растворе в результате диссоциации растворенного вещества. Способность растворов проводить электрический ток характеризуется обычно сопротивлением или электропроводностью.

Электропроводностью проводника (L) называется величина, обратная сопротивлению (R):

$$L = \frac{1}{R} \quad (30)$$

Сопротивление проводника (R) зависит от его длины ( $\ell$ ) и площади поперечного сечения (S):

$$R = \rho \frac{\ell}{S} \text{ (Ом)} \quad (31)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление.

Отсюда

$$L = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{\ell} \text{ (Ом}^{-1}\text{)} \quad (32)$$

Величина  $\frac{1}{\rho} = \chi$  называется удельной электропроводностью проводника. Ее можно представить как электропроводность  $1 \text{ см}^3$  материала проводника, имеющего площадь поперечного сечения  $1 \text{ см}^2$ . Размерность величины

$$\chi \text{ [Ом}^{-1}, \text{см}^{-1}\text{]}.$$

Величина удельной электропроводности зависит от числа ионов в единице объема (концентрации), скорости их перемещения и переносимого каждым ионом заряда. Эта зависимость выражается уравнением:

$$\chi = \alpha \cdot c \cdot F(U_{K^+} + U_{A^-}), \quad (33)$$

где  $\alpha$  - степень диссоциации;  $c$  - концентрация (г-экв/л);  $F$  - число Фарадея (количество электричества, необходимое для выделения 1 грамм-эквивалента вещества);  $U_{K^+}$  и  $U_{A^-}$  - абсолютные скорости перемещения ионов.

Кольрауш показал, что при постоянной температуре и вязкости разные ионы движутся с определенными скоростями, и эта скорость не зависит от скорости перемещения других ионов. Характеризуют скорость перемещения ионов величиной абсолютной скорости, под которой понимают путь, пройденный ионом в течение 1 сек. при градиенте напряжения 1 В/см. Зависимость удельной электропроводности от концентрации можно представить графически (рис. 9).

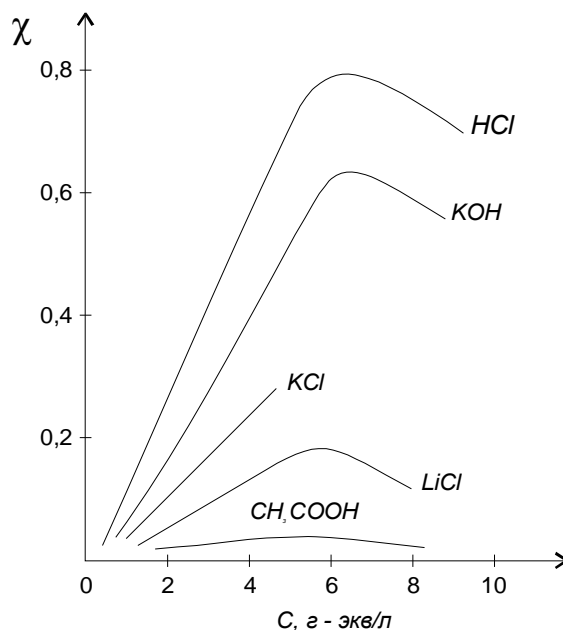


Рис. 9. Зависимость удельной электропроводности ( $\chi$ ) от концентрации ( $C$ ).

Поскольку передача электричества через раствор осуществляется движением ионов, то по мере увеличения концентрации удельная электропроводность растет. Однако при достижении достаточно большой концентрации  $\chi$  падает вследствие уменьшения степени диссоциации.

Для характеристики проводящей способности растворов электролитов, связанной только со степенью электролитической диссоциации, обычно применяют эквивалентную электропроводность.

Эквивалентная электропроводность  $\lambda$  есть электропроводность столба раствора длиной 1 см и с такой площадью поперечного сечения, что в межэлектродном пространстве помещается объем жидкости, содержащий 1 г-экв. растворенного вещества.

Чтобы установить соотношение удельной электропроводности  $\chi$  с эквивалентной  $\lambda$ , нужно первую величину умножить на объем раствора  $\varphi$ , содержащий 1 г-экв. электролита (обычно величину  $\varphi$  называют, "разведением" или "разбавлением"):

$$\lambda = \chi \varphi$$

если концентрация электролита  $C$  г-экв/л, то

$$\varphi = \frac{1}{C} \cdot 1000 \text{ см}^3 / \text{г} \cdot \text{экв}$$

Таким образом,

$$\lambda = \frac{\chi \cdot 1000}{C} \quad (\text{ом}^{-1} \text{ см}^2 / \text{г} \cdot \text{экв}) \quad (34)$$

Зависимость эквивалентной электропроводности от разведения раствора можно представить графически (рис.10).

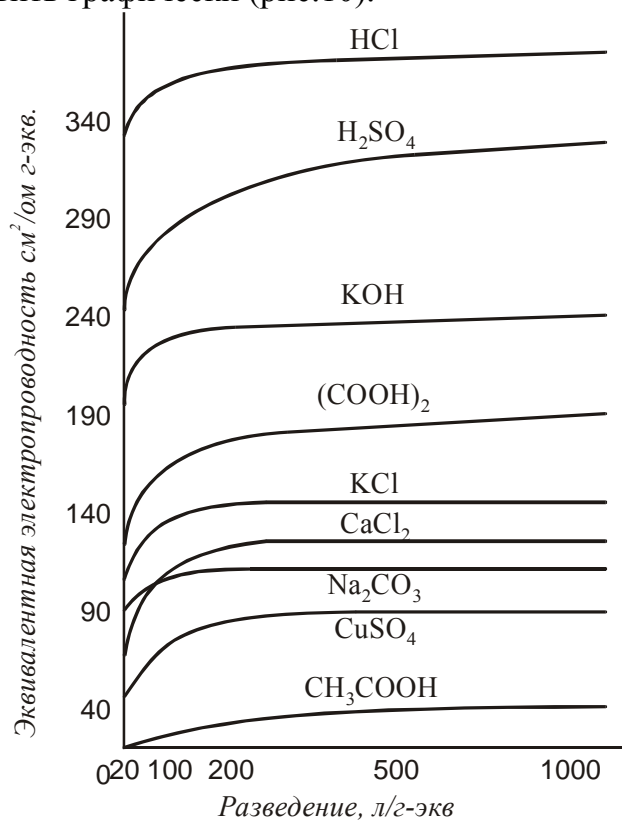


Рис.10. Зависимость эквивалентной электропроводности некоторых электролитов от разведения.

Предельное значение электропроводности электролита  $\lambda_0$  называют электропроводностью при бесконечном разведении (т.е. при бесконечно малой концентрации).

Для слабого электролита возрастание эквивалентной электропроводности при разбавлении определяется степенью электролитической диссоциации и вместе с ней стремится к некоторому пределу. Этот предел и есть  $\lambda_0$ .

Поскольку сильные электролиты при любой концентрации диссоциированы полностью, можно было бы ожидать, что их эквивалентная электропроводность при любой концентрации равна эквивалентной электропроводности при бесконечном разведении. Однако вследствие ионных взаимодействий эквивалентная электропроводность сильных электролитов с увеличением концентрации также уменьшается.

Для разбавленных растворов (до  $\sim 0,01$  н ) сильных электролитов зависимость эквивалентной электропроводности от концентрации может быть описана формулой Кольрауша:

$$\lambda = \lambda_0 - A\sqrt{C} \quad (35)$$

где  $A$  - постоянная величина, зависящая от природы растворителя и температуры.

В координатах  $\lambda - \sqrt{C}$  этому уравнению соответствует прямая линия. Определив электропроводность раствора при различных концентрациях и построив график зависимости  $\lambda$  от  $\sqrt{C}$ , можно путем графической экстраполяции определить величину  $\lambda_0$ .

Для слабых электролитов не наблюдается прямолинейной зависимости  $\lambda$  от  $\sqrt{C}$ , поэтому опыт показывает, что для них нельзя определить  $\lambda_0$  посредством экстраполяции опытных данных для эквивалентной электропроводности.

Для определения  $\lambda_0$  слабых электролитов пользуются расчетным методом, основанным на законе Кольрауша. Сущность последнего заключается в том, что подвижность ионов данного сорта в бесконечно разбавленном растворе не зависит от природы других ионов присутствующих в растворе. Это позволяет рассчитать  $\lambda_0$  слабого электролита суммированием значений подвижностей соответствующих ионов при бесконечном разбавлении.

$$\lambda_0 = l_+ + l_- \quad (36)$$

$l_+ + l_-$  - подвижности ионов.

Подвижности ионов пропорциональны абсолютным скоростям движения ионов и представляют собой абсолютные скорости, выраженные в единицах электропроводности:  $\lambda_+ = FU_+$  и  $\lambda_- = FU_-$ .

Таким образом, они выражаются в тех же единицах, что и  $\lambda$  (в  $\text{см}^2 \text{ ом}^{-1} \text{ г/экв}^{-1}$ ), т.е. относятся к 1 грамм-эквиваленту данных ионов.

Приведенное соотношение носит название закона аддитивности электропроводности или закона Кольрауша.

Электропроводность электролитов существенно зависит от температуры. С повышением температуры электропроводность растворов возрастает вследствие увеличения скорости движения ионов (уменьшение вязкости среды), следуя линейной зависимости

$$\lambda_t = \lambda_{18}(1 + a(t - 18)) \quad (37)$$

где  $\lambda_t$  и  $\lambda_{18}$  соответственно обозначают электропроводность при температуре  $t$  и  $18^\circ\text{C}$ ,  $a$  - температурный коэффициент электропроводности. Увеличение температуры на один градус приводит к возрастанию эквивалентной электропроводности на 2 - 2,5%. Поэтому при измерении электропроводности необходимо термостатирование.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Работа 1. Определение константы диссоциации слабого электролита

#### Определение постоянной сосуда

Измерению электропроводности раствора предшествует определение константы сосуда, в котором эти измерения производятся. Сопротивление раствора зависит не только от концентрации электролита, площади электродов и расстояния между ними, но от их взаимного расположения и объема раствора.

Поэтому удельная электропроводность  $\chi$  не равна измеренной электропроводности  $L$ , а ей пропорциональна

$$\chi = KL \quad (38)$$

Коэффициент пропорциональности  $K$  называют константой сосуда. Размерность ее  $[\text{см}^{-1}]$ , абсолютная величина зависит от отношения  $\frac{l}{S}$ , где  $l$  - расстояние между электродами, а  $S$  - площадь электродов.

Согласно уравнению (38)

$$K = \frac{\chi}{L} \text{ т.к. } L = \frac{1}{R},$$

то

$$K = \chi R \quad (39)$$

Значит для определения постоянной сосуда нужно измерить сопротивление раствора электролита, удельная электропроводность которого известна. Далее, зная постоянную  $K$ , нетрудно рассчитать удельную электропроводность любого электролита по величине его сопротивления

$$\chi = \frac{K}{R} \quad (40)$$

### 1. Измерение постоянной сосуда

В сосуд для измерения электропроводности наливают 10 мл стандартного раствора (обычно в качестве стандартного используют 0,02 или 0,01н KCl). Раствор термостатируют при заданной температуре, а затем приступают к измерениям - подключают сосуд к измерительной схеме и определяют сопротивление стандартного раствора.

#### Т а б л и ц а 8

Удельная электропроводность водных растворов хлористого калия,  $\chi$ , Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup>

t <sup>0</sup> C	Концентрация C, г-экв/л		
	0,1	0,2	0,01
15	0,01048	0,002243	0,001147
16	0,01072	0,002294	0,001173
17	0,01096	0,002345	0,001199
18	0,01119	0,002397	0,001225
19	0,01143	0,002449	0,001251
20	0,01167	0,002501	0,001278
21	0,01191	0,002553	0,001305
22	0,01215	0,002616	0,001332
23	0,01239	0,002659	0,001359
24	0,01264	0,002712	0,001386
25	0,01288	0,002765	0,001417

#### Т а б л и ц а 9

Подвижность некоторых ионов при бесконечном разбавлении (t=18<sup>0</sup>C)

Катион		Анион	
H <sup>+</sup>	315	OH <sup>-</sup>	174
Li <sup>+</sup>	32,6	Cl <sup>-</sup>	65,5
Na <sup>+</sup>	43,5	Br <sup>-</sup>	67,0
K <sup>+</sup>	64,6	I <sup>-</sup>	66,5
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	64,6	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	61,7
Ag <sup>+</sup>	54,3	SCN <sup>-</sup>	56,6
1/2Mg <sup>2+</sup>	45,0	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	35,0
1/2Ca <sup>2+</sup>	51,0	HCOO <sup>-</sup>	47,0
1/2Ba <sup>2+</sup>	55,0	<sup>1/2</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	68,0
1/2Zn <sup>2+</sup>	46,0	<sup>1/2</sup> CzO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	72,0
1/2Cd <sup>2+</sup>	46,0	<sup>1/2</sup> CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	70,0
1/2Cu <sup>2+</sup>	46,0	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COO <sup>-</sup>	31
1/3Fl <sup>3+</sup>	61,0	F <sup>-</sup>	47,6
1/3Al <sup>3+</sup>	40,0	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CJ <sup>-</sup>	32,5



Постоянную сосуда вычисляют по формуле (39), где  $\chi$  - удельная электропроводность стандартного раствора KCl (см. табл. 8).

## 2. Определение удельной электропроводности и расчет константы диссоциации слабого электролита

Сосуд для измерения электропроводности промывают водой, затем исследуемым раствором, наливают в него 10 мл раствора электролита и термостатируют в течение 10-15 минут. Затем подключают сосуд к измерительной схеме и определяют сопротивление раствора электролита.

Такие измерения проводят для четырех-пяти различных концентраций. Разбавление раствора ведут в том же сосуде, в котором измеряют электропроводность. При каждом разбавлении из раствора удаляют ровно половину содержащегося в нем раствора и добавляют такое же количество дистиллированной воды. При этом необходимо пользоваться двумя пипетками одинаковой номинальной емкости (например, 5 мл, если общий объем исследуемого раствора 10 мл), одна из которых должна быть на "отбирание" жидкости, другая - на "вливание" ее.

Растворы после разбавления перемешиваются.

Результаты измерений представляют в виде таблицы 10.

Таблица 10

Измерение сопротивления и расчет константы диссоциации слабой кислоты.

концентрация растворов $C$ , г-экв/л	измеренное сопротивление $R$ , ом	удельная электропроводность, $\chi$ , Ом · см	эквивалентная электропроводность, $\lambda$ , Ом · см /г-экв	степень диссоциации, $\alpha$	константа диссоциации, $K_s$
---	--------------------------------------	---	--	----------------------------------	---------------------------------

По формулам (40) и (34) рассчитывают удельную и эквивалентную электропроводности и строят графики зависимости этих величин от концентрации.

Далее по уравнению (36), используя данные таблицы 9, вычисляют эквивалентную электропроводность при бесконечном разведении и используют это значение для вычисления степени диссоциации слабого электролита:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\lambda_0}$$

Из закона разведения Оствальда (для бинарного электролита)

$$K_{\alpha} = \frac{\alpha^2 C}{1 - \alpha} \quad (41)$$

вычисляют константу диссоциации. Проверка уравнения Оствальда может быть выполнена для уксусной, бензойной и других слабых кислот. Константа диссоциации этих электролитов не зависит от концентрации. На этом основывается специальный графический метод изображения результатов измерений электропроводности и проверки справедливости уравнения (41).

Если выразить степень диссоциации через отношение электропроводностей ( $\alpha = \frac{\lambda}{\lambda_0}$ ) и подставить в уравнение (41), получим:

$$K = \frac{\lambda^2 C}{\lambda_0(\lambda_0 - \lambda)} \quad (42)$$

Решая это уравнение относительно  $\lambda C$ , после некоторых преобразований, можно записать

$$\lambda C = K \lambda_0^2 \frac{1}{\lambda} - K \lambda_0,$$

т.е. произведение  $\lambda C$  - эквивалентная электропроводность, умноженная на концентрацию раствора, представляет линейную функцию  $\frac{1}{\lambda}$

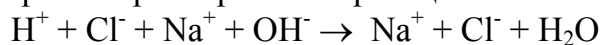
$$\lambda C = a \frac{1}{\lambda} + b$$

где  $a = K \lambda_0^2$  и  $b = -K \lambda_0$  - постоянные величины. Откладывая значения  $\lambda C$  в виде функции  $\frac{1}{\lambda}$ , действительно, на графике получаем прямую, если величина константы диссоциации не зависит от разбавления раствора. Прямая, построенная в координатах  $\frac{1}{\lambda} - \lambda C$ , дает возможность определить величины  $\lambda_0$  и  $K$ .

## ***Работа 2. Кондуктометрическое титрование***

Метод измерения электропроводности нашел применение в объемном анализе, так называемом кондуктометрическом титровании. Он с успехом применяется в том случае, когда исследуемые растворы являются окрашенными, мутными или содержат взвешенные частицы, когда между анализируемым и титрующим растворами могут протекать обменные ионные или окислительно-восстановительные реакции, в результате которых изменяется проводящая способность раствора. Своеобразным индикатором в этом методе является изменение электропроводности в процессе титрования. Таким образом, эквивалентную точку при кондуктометрическом титровании определяют по изменению электропроводности.

Часто пользуются кондуктометрическим титрованием при нейтрализации кислот и оснований. Рассмотрим титрование сильной кислоты (HCl) сильным основанием (NaOH), при котором протекает реакция:



При титровании электропроводность раствора уменьшается (рис. 11, от точки А до точки эквивалентности В), так как у ионов  $\text{Na}^+$ , заменяющих в процессе титрования ионы  $\text{H}^+$ , точнее  $\text{H}_3\text{O}^+$ , подвижность значительно меньше (табл. 9), к тому же происходит разбавление раствора.

В момент нейтрализации электропроводность раствора достигнет минимума. При дальнейшем прибавлении щелочи в растворе будет увеличиваться общее число ионов, среди которых появляются ионы  $\text{OH}^-$  с большой подвижностью (табл. 9). Вследствие этого электропроводность будет возрастать (рис. 11, от точки В до точки С).

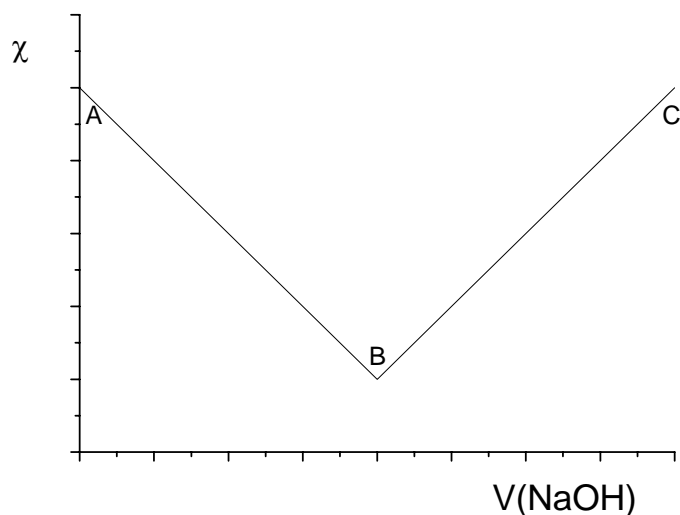
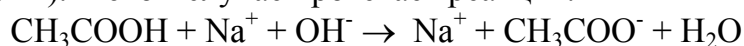


Рис.11. Кривая титрования сильной кислоты сильным основанием.

Кривая титрования слабой кислоты ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) имеет несколько другой вид (рис. 12). В этом случае протекает реакция:



Во время титрования плохо диссоциирующую уксусную кислоту заменяют хорошо диссоциирующей солью, поэтому электропроводность раствора увеличивается (рис. 12, от точки А до точки эквивалентности В). После нейтрализации кислоты электропроводность растет еще более сильно, так как в растворе появляются в избытке гидроксид-ионы  $\text{OH}^-$ , обладающие большой подвижностью (рис. 12, от точки В до точки С).

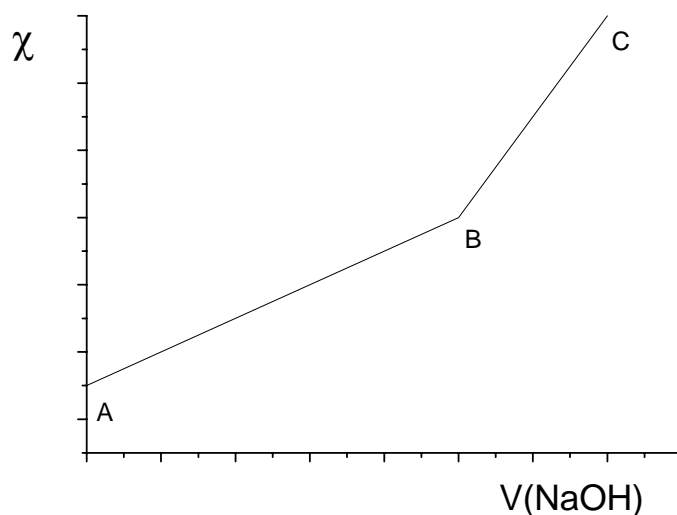


Рис.12. Кривая титрования слабой кислоты сильным основанием.

Кондуктометрическое титрование может быть применено и в том случае, когда в растворе присутствует смесь сильной и слабой кислот. При добавлении щелочи прежде всего нейтрализуется сильная кислота, и вследствие этого электрическая проводимость раствора уменьшается (рис. 13). После того, как вся сильная кислота прореагирует, начинается нейтрализация слабой кислоты и электропроводность начинает медленно увеличиваться. После окончания реакции и приливания избыточного количества щелочи в растворе появляется избыток ионов  $\text{OH}^-$  и электропроводность быстро возрастает. На кривой (рис. 13) появляются 2 точки перегиба: A – соответствует эквивалентной точке сильной кислоты, - и B - соответствует эквивалентной точке слабой кислоты.

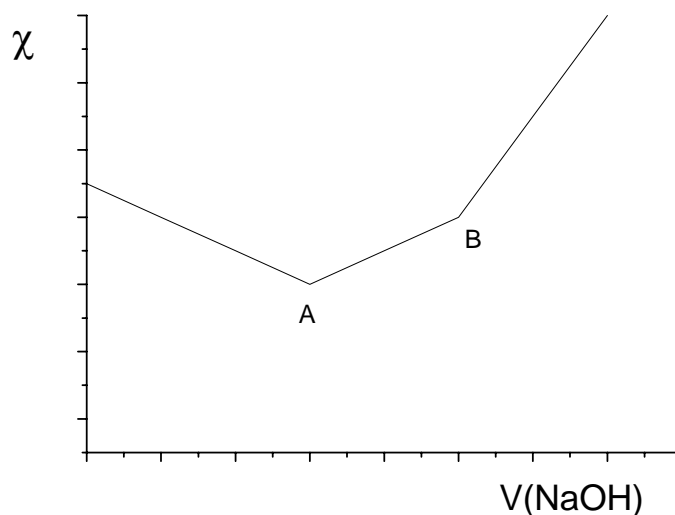


Рис.13. Кривая титрования слабой кислоты сильным основанием.

### 1. Ознакомьтесь с работой кондуктометра ОК 102-I

Кондуктометр предназначен для определения электропроводности растворов. Прибор снабжен шкалой, отградуированной в единицах сименс ( $\text{ом}^{-1}$ ), позволяющей делать отчеты электропроводности без дополнительной компенсации. Предел измерения кондуктометра - от 0,1 микросименса до 0,5 сименса.

#### *Инструкция по работе на кондуктометре ОК 102/I*

- а) Включить прибор в сеть, кнопку "ON" поставить в верхнее положение, прогреть прибор в течение 5 мин.
- б) Калибровка. Переключатель пределов измерения "Range" поставить в положение 150 мксименс, затем нажать кнопку "Cal". Потенциометром "Calibration" стрелку прибора установить на красную метку.

### 2. Проведите кондуктометрическое титрование раствора:

- а) сильной кислоты,
  - б) слабой кислоты,
  - в) смеси сильной и слабой кислот
- раствором сильного основания.

Для титрования берется 10 мл кислоты (сильной или слабой, или смесь сильной и слабой кислот), которая разбавляется таким количеством воды, чтобы электроды были полностью погружены в раствор. Рабочий раствор залить в ячейку и погрузить в него электроды. Переключатель пределов измерения поставить в положение 500 мксименс; если показание мало, увеличить чувствительность прибора.

Из полученных значений электропроводности строят график зависимости  $\chi$  от количества прибавляемого раствора щелочи. По графику находят эквивалентную точку и определяют концентрацию раствора, взятого для исследования. Щелочь из бюретки приливается постепенно, сначала по 1 мл (до 6-7 мл), затем 0,5, 0,1 мл; каждый раз содержимое сосуда перемешивается, и с помощью кондуктометра марки ОК 102/I измеряется электропроводность раствора. Для более наглядной картины конца титрования приливается некоторое избыточное количество щелочи (до 14 мл). Результаты измерений и расчетов сводятся в таблицу 11.

Таблица 11

Измерение электропроводности при титровании кислоты щелочью.

№ пп	Объем электро- лита, V, мл	Объем прилитого реагента, V, мл	Величина $\chi$ , $\text{ом}^{-1}$ $\text{см}^{-1}$ (сименс)	Эквивалентная точка
---------	-------------------------------	------------------------------------	---	------------------------

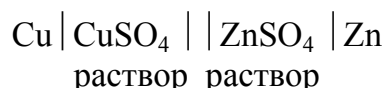
#### 4. ТЕОРИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА Э.Д.С.

Ознакомьтесь со следующими теоретическими вопросами:

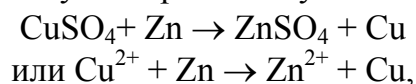
Гальванический элемент. ЭДС и электродные потенциалы. Формула Нернста. Стандартный потенциал. Классификация электродов: электроды первого и второго рода, Ох/Red электроды. Понятие о рН. Электрометрический метод определения рН. Индикаторные электроды (водородный, хингидроновый, стеклянный).

Прибор, в котором в результате химической реакции получают электрическую энергию, т.е. химическую энергию превращают в электрическую, называется гальваническим элементом.

Гальванический элемент состоит из двух или более соприкасающихся друг с другом растворов электролитов, в которые погружены металлические пластинки – электроды. Примером такой системы может служить медно-цинковый гальванический элемент, который схематически можно представить следующим образом:



В этом элементе электрическую энергию получают в результате реакции:



причем процессы окисления и восстановления пространственно разделены:

на катоде:  $\text{Cu}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$

на аноде:  $\text{Zn} - 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Zn}^{2+}$ .

В зависимости от природы металлов, погруженных в электролит, от концентрации электролита и температуры, в гальваническом элементе возникает электродвижущая сила (ЭДС), которая представляет собой разность потенциалов, возникающих на границе раздела металл – раствор.

При погружении металлической пластинки в воду атомы металла, находящиеся в его поверхностном слое, под действием сильно полярных молекул воды гидратируются. В результате гидратации связь их с остальными атомами ослабляется и некоторое количество атомов, отрываясь от металла, переходит в виде гидратированных ионов в слой жидкости, прилегающий к поверхности металла. При этом металлическая пластинка заряжается отрицательно:



где Me – атом металла,  $\text{Me}^+ * n \text{H}_2\text{O}$  – гидратированный ион металла,  $\text{e}^-$  – электрон.

Между положительно заряженными ионами, перешедшими в раствор, и отрицательно заряженной пластинкой металла возникает электрическое поле, которое препятствует дальнейшему течению процесса. Однако процесс не останавливается, т.е. переход ионов металла в жидкость не прекращается, но одновременно с такой же скоростью протекает обратный процесс перехода

ионов из раствора на поверхность металла. В системе устанавливается подвижное равновесие. Между металлом и окружающей средой возникает разность потенциалов, которая называется электродным потенциалом.

На основании теоретических расчетов установлено, что величина электродного потенциала, возникающая на границе между металлом и раствором соли этого металла, т.е. раствором, содержащим ионы этого металла, равна:

$$\varphi = \varphi^0 + \frac{RT}{nF} \ln a \quad (43)$$

где  $\varphi^0$  – стандартный потенциал электрода ( $T=298\text{K}$ ,  $P=1\text{атм}$ ,  $a=1$ )

$R$  – газовая постоянная

$F$  – число Фарадея

$T$  – температура,  $\text{K}$

$n$  – число электронов, участвующих в Ок/Red реакции

$a$  – активная молярная концентрация ионов металла в растворе.

Уравнение (43) выражает зависимость потенциала электрода от концентрации ионов металла в растворе, от температуры, природы электрода (уравнение Нернста).

Известно, что не существует методики непосредственного измерения скачка потенциала, измерять можно только разность потенциалов (ЭДС). Электродвижущая сила гальванического элемента может рассматриваться как алгебраическая сумма нескольких отдельных скачков потенциала на границе между различными фазами. Существует три различных типа скачков потенциалов. Электродные потенциалы  $\varphi$  – на границе металл – раствор; контактные потенциалы  $\varphi_{\kappa}$ , возникающие на границе соприкосновения двух металлов; диффузионные потенциалы  $\varphi_{\text{д}}$ ; суммарная величина этих трех потенциалов и обуславливает возникающую разность потенциалов или электродвижущую силу гальванического элемента.

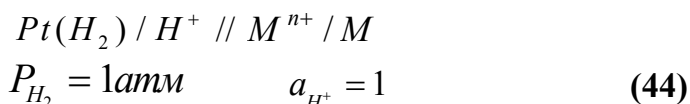
Последние два скачка являются весьма малыми по своей абсолютной величине, и в большинстве случаев ими пренебрегают или пытаются их еще больше уменьшить. В случае диффузионных потенциалов их уменьшение достигается применением солевых мостиков с концентрированными растворами солей, ионы которых обладают одинаковой подвижностью ( $\text{KCl}$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) контактную разность потенциалов легко уменьшить, применяя в местах соприкосновения одинаковые металлы.

Абсолютные значения электродных потенциалов неизвестны. Поэтому потенциалы электродов определяются относительно какого-либо электрода, потенциал которого условно принимается за нуль. В настоящее время широко применяется условная водородная шкала, в которой при всех температурах за нуль выбран потенциал стандартного водородного электрода.

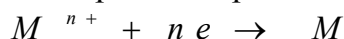
Водородный электрод представляет собой пластину из  $\text{Pt}$  (обычно с развитой поверхностью), омываемую газообразным водородом и опущенную в раствор, содержащий ионы водорода. За нуль выбран потенциал такого

электрода при давлении газообразного водорода, равном 1 атм, и при активности водородных ионов в растворе, равной единице.

Согласно Международной конвенции (1953) электродный потенциал определяется величиной ЭДС электрохимической системы, состоящей из данного электрода  $M^{n+} / M$  и стандартного водородного электрода.

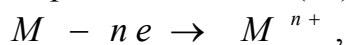


Электродный потенциал правого электрода в элементе (44) считается положительным, если на нем протекает реакция:



т.е. разряжаются положительно заряженные ионы  $M^{n+}$ .

Если же на правом электроде в элементе (44) идет реакция окисления:



то потенциал правого электрода принято считать отрицательным.

Значения стандартных потенциалов некоторых электродов (по водородной шкале) при 25°C и отвечающие им электродные реакции приводятся в таблице 12.

Таблица 12

Стандартные электродные потенциалы  $\varphi^0$  в водных растворах

Электроды	Реакция	$\varphi^0$ , В
$Zn^{2+} / Zn$	$Zn^{2+} + 2e \leftrightarrow Zn$	-0,763
$Cd^{2+} / Cd$	$Cd^{2+} + 2e \leftrightarrow Cd$	-0,403
$Ni^{2+} / Ni$	$Ni^{2+} + 2e \leftrightarrow Ni$	-0,24
$Pb^{2+} / Pb$	$Pb^{2+} + 2e \leftrightarrow Pb$	-0,126
$H^{2+} / H_2$	$H^+ + e \leftrightarrow \frac{1}{2} H_{2(2)}$	0,0
$Cu^{2+} / Cu$	$Cu^{2+} + 2e \leftrightarrow Cu$	0,337

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДОВ

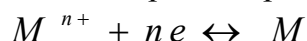
В зависимости от устройства и природы электродной реакции различают электроды первого рода, второго рода, газовые, окислительно-восстановительные и некоторые другие виды электродов.

К электродам первого рода относятся электроды типа:

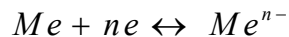
а)  $M^{n+} / M$  (М - металл;  $M^{n+}$  - потенциал, определяющий катион того же металла);

б)  $Me^{n-} / Me$  ( $Me$  - металлоид,  $Me^{n-}$  - потенциал, определяющий анион того же металлоида).

Электродные реакции для электродов I рода записываются так:







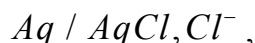
Учитывая, что активность чистых твердых  $M$  и  $Me$  при заданной температуре постоянна и принята условно равной единице, для электродного потенциала электрода первого рода получим уравнение:

$$\varphi_{M^{n+}/M} = \varphi^0_{M^{n+}/M} + \frac{RT}{nF} \ln a_{Me^{n+}} \quad (45)$$

или:

$$\varphi_{Me^{n-}/Me} = \varphi^0_{Me^{n-}/Me} - \frac{RT}{nF} \ln a_{Me^{n-}} \quad (46)$$

Электроды второго рода представляют собой полуэлементы, состоящие из металла  $M$ , покрытого слоем его труднорастворимого соединения  $MA$  и погруженного в раствор другого хорошо растворимого соединения, содержащий тот же анион  $A^{n-}$ , что и труднорастворимое соединение металла, являющегося электродом. Примером может служить серебряный электрод в растворе, содержащем хлористый калий и находящемся в равновесии с твердым хлористом серебром. Такой электрод можно представить так:



а его потенциал вычислить по формуле:

$$\varphi_{AgCl} = \varphi^0_{AgCl} - \frac{RT}{nF} \ln a_{Cl^{-}} \quad (47)$$

Величины потенциалов электродов второго рода легко воспроизводимы и устойчивы, поэтому эти электроды часто применяются в качестве стандартных полуэлементов или электродов сравнения, по отношению к которым измеряют потенциалы других электродов.

Газовые электроды представляют собой полуэлементы, состоящие из металлического (химически инертного) проводника, контактирующего одновременно с соответствующим газом и с раствором, содержащим ионы этого газа. Металл в газовых электродах не только создает электронно-проводящий электрический контакт между газом и раствором его ионов, но и ускоряет медленно устанавливающееся электродное равновесие. Чаще всего таким металлом является платина, покрытая платиновой чернью. Простейшим из газовых электродов является водородный электрод, которому отвечает электродная реакция:



Уравнение для электродного потенциала водородного электрода запишется так:

$$\varphi_{H^{+}/H_2} = \frac{RT}{F} \ln \frac{a_{H^{+}}}{P_{H_2}} \quad \text{т.к.} \quad \varphi^0_{H^{+}/H_2} = 0$$

Окислительно-восстановительные электроды - это системы, состоящие из инертного металла (Pt, Au и др.), обменивающегося электронами с

участниками окислительно-восстановительной реакции, находящимися в одной и той же жидкой фазе. Различают простые и сложные редокси-электроды. В случае простых редокси-электродов, электродная реакция сводится к перемене валентности без изменения их состава, например:



Для потенциала редокси-электрода получим выражение:

$$\varphi = \varphi^0 + 2,3 \frac{RT}{nF} \lg \frac{a_{ox}}{a_{red}} \quad (48)$$

В сложных редокси-электродах реакция протекает с изменением валентности реагирующих частиц и их состава.

### **КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ Э.Д.С. И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ**

При работе гальванического элемента его э.д.с. не сохраняет строго определенного значения вследствие изменений, происходящих у электродов и в объеме раствора. Поэтому точное измерение э.д.с. проводят методом компенсации в условиях обратимой работы элемента.

Наиболее совершенными компенсационными приборами, позволяющими измерять э.д.с. с точностью до 0,01 мВ и даже до 0,0001 мВ, являются потенциометры (компенсаторы) постоянного тока. Высокая точность измерения достигается совершенной установкой рабочего тока и большим набором очень точных сопротивлений.

В лаборатории для измерения  $E$  используются компараторы напряжения Р 3003. Ниже приводится порядок работы на приборе.

#### **ПОРЯДОК РАБОТЫ с компаратором напряжения Р 3003**

Компаратор напряжений Р 3003 предназначен для измерения напряжений постоянного тока. Для того чтобы привести прибор в рабочее состояние включить вилку питания прибора в розетку с напряжением 220 В. Ряды декад «X<sub>1</sub>» и «X<sub>2</sub>» должны быть установлены на «О». Нажать кнопку «сеть» на передней панели прибора, при этом должна загореться контрольная лампа, а стрелка показывающего прибора установиться на ноль, после некоторого прогрева прибора, в центре. Чувствительность показывающего прибора может изменяться в широких пределах (10<sup>-6</sup> В – 10 В), с помощью кнопок расположенных под ним. В начальный момент должна быть включена кнопка «10 В», а переключатель рода работ включен в положение «И<sub>2</sub>». На вход «И<sub>1</sub>» следует подключить, соблюдая полярность, гальванический элемент, ЭДС которого требуется измерить. Подключение выполняется с помощью специального маркированного кабеля. Далее приступить к измерению ЭДС гальванического элемента. Для этого включить переключатель рода работ в

положение «И<sub>1</sub>». Стрелка показывающего прибора должна отклониться от нуля. Включить кнопку ряда декад X<sub>1</sub> (или X<sub>2</sub>) и изменяя напряжение с помощью декад X<sub>1</sub> (X<sub>2</sub>) добиться того, чтобы стрелка показывающего прибора вернулась на ноль. Для точного измерения ЭДС повысить чувствительность измерительного прибора нажатием кнопки предела шкалы 1 В и подобрать с помощью декадных переключателей более точное значение компенсирующего напряжения, операцию подбора напряжения заканчивать при чувствительности показывающего прибора 10 мВ. Точное значение ЭДС в микровольтметрах покажет сумма цифр декадных переключателей ряда (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### *Работа 1. Измерение ЭДС гальванических элементов.*

В данной работе исследуется влияние концентрации растворов на величину ЭДС элемента.

Измерение ЭДС нужно провести при следующих нормальных (г-экв/л) концентрациях растворов:

M <sub>I</sub>	1,0	0,1	1,0	0,1
M <sub>II</sub>	1,0	1,0	0,1	0,1

Перед измерением электроды зачищают наждачной бумагой до блеска, обезжиривают, промывают тщательно водопроводной, а затем дистиллированной водой и опускают сразу же в соответствующие сосуды, заполненные предварительно растворами сульфата M<sub>I</sub> и M<sub>II</sub>

Электродные сосуды соединяют между собой электролитическим ключом, заполненным желатинообразным раствором агар-агара с 4,5% KCl и полученную гальваническую цепь включают в измерительную схему.

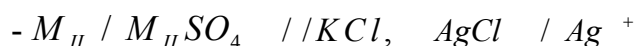
Полученные данные сопоставляют с рассчитанными величинами ЭДС по уравнению Нернста, указав процент ошибки.

*Измерение потенциалов отдельных электродов.*

Измерение потенциалов электродов проводится для одно- и децинормальной концентрации соответствующих растворов. В качестве электрода сравнения применяются насыщенный хлорсеребряный электрод. Гальванические элементы составляются по следующей схеме:



или



Определив значение ЭДС для двух концентраций (E<sub>I</sub> и E<sub>II</sub>), вычисляют потенциалы металлического электрода по формуле:

$$\varphi_{MI} = E + \varphi_{э.ср} \text{ или } \varphi_{MII} = \varphi_{э.ср} - E \quad (49)$$

Все результаты сводят в таблицу 13.

Таблица 13

Измерение и вычисление ЭДС исследуемых гальванических элементов.

№ опыта	Схема цепи	$E_{изм}$	$E_{выч}$	$\varphi_{выч}$	$\varphi_{экс}$	% ошибки
---------	------------	-----------	-----------	-----------------	-----------------	----------

## Работа 2. Определение pH растворов

Активность ионов водорода, а следовательно pH, может быть определена различными методами (калориметрическим, кинетическим и электрометрическим). Из них наиболее разработанным и точным является электрометрический, основанный на определении величины электродного потенциала. В качестве электродов должны быть выбраны такие, потенциал которых зависит от концентрации ионов водорода и может быть вычислен по уравнению:

$$\varphi_x = \varphi^0 + v \lg a_{H^+} \quad (50)$$

где  $\varphi^0$  и  $v$  - постоянные величины.

Такие электроды называются индикаторными. К ним относятся: водородный, хингидронный и стеклянный.

### а) Индикаторный электрод - водородный

Для измерения pH раствора обычно собирают гальванический элемент из электрода сравнения (хлорсеребряного) и индикаторного электрода (водородного):



в которой положительным полюсом служит электрод сравнения. Электродвижущая сила этой цепи измеряется компенсационным методом с использованием компаратора Р 3003.

Обозначив ЭДС этой цепи через  $E_1$ , получим:

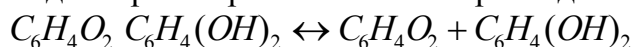
$$E_1 = \varphi_{э.с.} - \varphi_{H_2} = \varphi_{э.с.} + 0,058 pH \quad (51)$$

откуда:

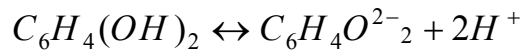
$$pH = \frac{E_1 - \varphi_{э.с.}}{0,058}$$

### б) Индикаторный электрод – хингидронный.

Хингидрон представляет собой эквимолекулярное соединение хинона и гидрохинона. В водных растворах он частично распадается по уравнению:



Гидрохинон - слабая кислота, он в незначительной степени диссоциирует на ионы:



Суммарная реакция, протекающая на электроде, выражается уравнением:



Хингидронный электрод относится к группе окислительно-восстановительных электродов и потенциал его при 18<sup>0</sup> может быть выражен уравнением:

$$\varphi_{X.G.} = \varphi^0_{X.G.} + \frac{0,058}{2} \lg \frac{a_{X.G.} \cdot a_{H^+}^2}{a_{G.X.}} \quad (53)$$

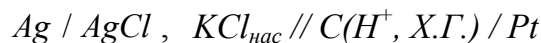
для кислых растворов:  $a_{X.G.} = a_{G.X.}$ , поэтому

$$\varphi_{X.G.} = \varphi^0_{X.G.} + 0,058 \lg a_{H^+} \quad (54)$$

Нормальный электродный потенциал хингидронного электрода, при 18<sup>0</sup>С равный 0,704 В, имеет довольно большой температурный коэффициент. Формула зависимости его от температуры между 0 и 37<sup>0</sup> имеет вид:

$$\varphi^0_{X.G.} = 0,7175 - 0,00074 \cdot t \quad (55)$$

Хингидронный электрод получают, помещая гладкий платиновый электрод в исследуемый раствор, в который насыпают небольшое количество порошка хингидрона. Составляют цепь из электрода сравнения (хлорсеребряного) и индикаторного электрода (хингидронного):



в которой хингидронный электрод является положительным. ЭДС этого элемента:

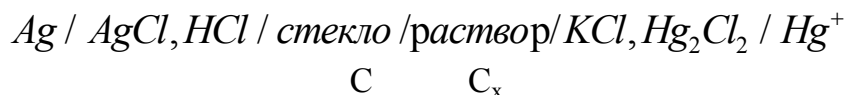
$$E_2 = \varphi_{X.G.} - \varphi_{Э.С.} = \varphi^0_{X.G.} - 0,058 pH - \varphi_{Э.С.}$$

откуда:

$$pH = \frac{\varphi^0_{X.G.} - \varphi_{Э.С.} - E_2}{0,058} \quad (56)$$

в) *Индикаторный электрод – стеклянный.*

В лабораторной практике широкое применение находит стеклянный электрод. Он представляет собой тонкостенный стеклянный шарик диаметром 1 - 1,5 см, заполненный стандартным раствором, в который помещен чаще всего хлорсеребряный электрод. Для измерения рН стеклянный электрод погружают в исследуемый раствор в паре с электродом сравнения. ЭДС цепи -



выражается уравнением:

$$E_3 = \varphi_{Э.С.} - \varphi_{ст.эл.} = \varphi_{Э.С.} - \varphi^0_{ст.эл.} - m \lg a_{H^+} \quad (57)$$

где  $\varphi^0$  - нормальный потенциал стеклянного электрода, зависящий от сорта стекла, состава раствора, наполняющего шарик, температуры;  $m$  -

константа, несколько меньше теоретического значения ( $\frac{2,3RT}{F}$ ) за счет малого сопротивления потенциометра и наличия утечек тока в цепи.

Результаты измерений pH растворов сводят в таблицу 14.

Таблица 14

Значения pH буферных растворов.

№ растворов	pH (с хингидр. электродом)	pH (со стекл. электродом)

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА МЕТАЛЛА ПО ТОКУ

Ознакомьтесь со следующими теоретическими вопросами:

Электролиз растворов и расплавов. Катодные и анодные процессы (в зависимости от природы ионов, находящихся в электролите и от материала электрода). Гальванический метод и его сущность. Определение выхода металла по току. Законы Фарадея. Кулонометры.

Сущность гальванического метода состоит в нанесении на поверхность изделий относительно тонких слоев металла при помощи извне приложенного тока из электролитов, содержащих ионы осаждаемого металла.

В процессе электролиза на электродах выделяются продукты восстановления или окисления в соответствии с законами Фарадея. На основании этих законов можно рассчитать, например, вес металла, который должен выделяться на катоде при прохождении определенного количества электричества:

$$\Delta m = \frac{I \cdot t \cdot \mathcal{E}_{me}}{26,8} (\text{г}), \quad (58)$$

где  $I$  - сила тока, проходящего через электролизер, А;  $t$  - время электролиза, час;  $\mathcal{E}_{me}$  - эквивалентный вес металла, гр;  $\Delta m$  - вес осадка (привес катода), гр; 26,8 - число Фарадея, в А · час,

Однако практически всегда на катоде при электроосаждении металлов протекают побочные реакции восстановления, на которые также затрачивается определенная доля прошедшего через электролит тока или количества электричества. Чаще всего такой параллельной реакцией является реакция восстановления водорода.

Отношение количества электричества, затраченного на данную электродную реакцию, к общему количеству прошедшего через раствор электричества, выраженное в процентах, называется выходом по току:

$$h = (g_i / \sum g_i) \cdot 100\% \quad (59)$$

При электроосаждении металлов выход по току может быть выражен через пропорциональные величины фактического привеса катода и теоретически вычисленного по закону Фарадея привеса катода в предположении, что весь ток тратился на восстановление металла:

$$h = \frac{\Delta m_{\Phi}}{\Delta m_T} \cdot 100\% \quad (60)$$

или, используя уравнение (58):

$$h = \frac{\Delta m_{\Phi} \cdot 26,8 \cdot 100}{I \cdot t \cdot \mathcal{E}_{me}} \quad (61)$$

Часто ток во время электролиза не остается постоянным и, кроме того, измерение его с достаточной точностью затруднительно. В таких случаях используется измерение количества электричества при помощи приборов или устройств, называемых кулонометрами. Наиболее просты так называемые

химические кулонометры, в которых на катоде или аноде протекает лишь одна реакция и поэтому  $\Delta m_{\text{ф}} = \Delta m_{\text{т}}$ . Очень часто используется медный кулонометр. Расчет выхода по току при помощи его производится по формуле:

$$h = \frac{\Delta m_{Me} \cdot \mathcal{E}_{Cu} \cdot 100}{\Delta m_{Cu} \cdot \mathcal{E}_{Me}} = \frac{\Delta m_{Me} \cdot 31,785 \cdot 100}{\Delta m_{Cu} \cdot \mathcal{E}_{Me}} \quad (62)$$

где:  $\Delta m_{Me}$  - вес металлического покрытия (привес катода), в гр;  $\Delta m_{Cu}$  - привес катода в кулонометре, в гр;  $\mathcal{E}_{Me}$  - эквивалентный вес металла.

### **Работа 1. Определение выхода металла по току.**

Схема установки для определения выхода металла по току с использованием кулонометра приведена на рис.14.

В качестве катодов используются стальные (или медные) пластины.

Для кулонометра используют электролит состава:

$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	125 г/л
$H_2SO_4 (\alpha) = 1,84$	25 мл
Этиловый спирт	50 мл

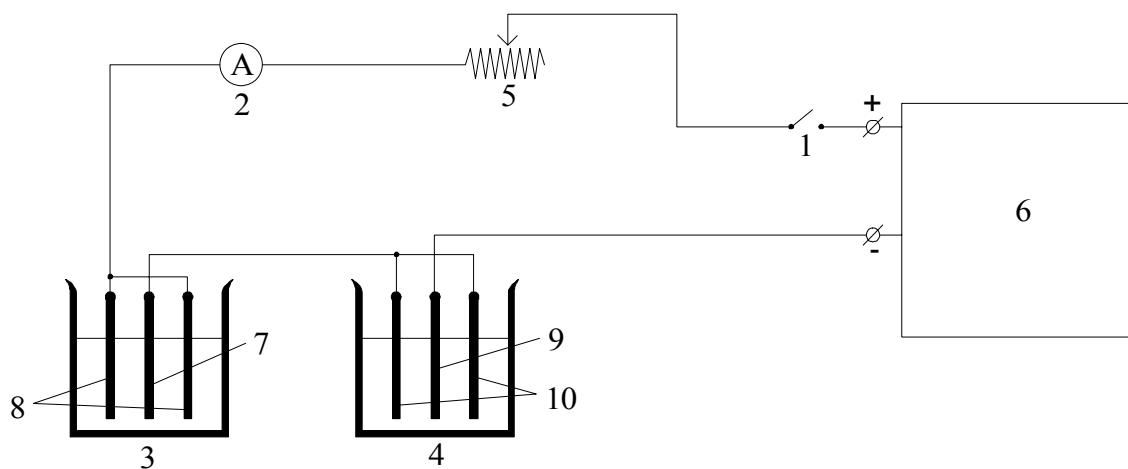


Рис.14. 1 - выключатель, 2 - миллиамперметр, 3 - электролизер, 4 - кулонометр, 5 - реостат, 6 - выпрямитель, 7, 8 - катод и аноды электролизера, 9, 10 - катод и аноды кулонометра.

Подготовку образцов катодов проводят в следующем порядке: зачищают образцы наждачной бумагой, вычисляют их поверхность с учетом обеих сторон и толщины (катод кулонометра измерять не нужно), протирают ватой, смоченной ацетоном, промывают дистиллированной водой, высушивают фильтровальной бумагой и взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,0002 г.



Аноды в ваннах для нанесения покрытий в кулонометре зачищают наждачной бумагой (если они имеют темный цвет), обезжиривают, тщательно промывают проточной холодной водой и навешивают в электролизер.

Присоединяют последовательно соединенные электролизер и кулонометр к источнику постоянного напряжения и реостатом устанавливают предварительно рассчитанную по площади образца катода силу тока.

По истечении заданного времени катоды вынимают из ванны, промывают холодной проточной водой, затем споласкивают дистиллированной водой, высушивают в сушильном шкафу и взвешивают.

По формулам (61) и (62) рассчитывают выход по току.

*Определение выхода по току осуществляется для электролита цинкования или для электролита никелирования по заданию преподавателя.*

## 6. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ, УСТОЙЧИВОСТЬ И КОАГУЛЯЦИЯ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Ознакомьтесь со следующими теоретическими вопросами:

Понятия: дисперсная фаза и дисперсионная среда. Классификация коллоидных систем по типу: дисперсная фаза / дисперсионная среда (Т/Ж, Г/Ж, Г/Т и т.д.), примеры коллоидных систем для каждого типа. Строение коллоидной частицы. Правило Фаянса-Панета. Устойчивость и коагуляция коллоидных систем, влияние различных факторов. Правило Шульце-Гарди.

### Коллоидное состояние вещества

Представление о коллоидах как об особой группе веществ вошло в науку в середине XIX века. Растворы этих веществ отличались от обычных рядом признаков, в частности, тем, что растворенное вещество не проходило через мембраны с очень тонкими порами и не обнаруживало заметной диффузии.

В начале XX века было установлено, что любое вещество может быть получено в виде коллоида и, следовательно, нужно говорить не о коллоидных веществах, а о коллоидном состоянии как о всеобщем особом состоянии материи (это было сформулировано впервые П. П. Веймарном).

Согласно определению, данному П. А. Рёбиндером, коллоидная химия - это физико-химия дисперсных систем и поверхностных явлений в этих системах.

### Основные определения

**Фаза** - Часть системы одного состава, имеющая одинаковые физические свойства, ограниченная от других частей поверхностью раздела. Систему, состоящую из одной фазы, а следовательно, имеющую одинаковые макроскопические свойства во всех ее точках, называют гомогенной. Гетерогенная система состоит из двух и более фаз.

**Дисперсность** - Коллоидное состояние характеризуется определенной дисперсностью (раздробленностью) вещества. Вещество в этом состоянии диспергировано до очень малых частиц или пронизано мельчайшими порами. Эти частицы и поры невидимы в оптическом микроскопе, но превышают по размерам обычные молекулы. Поскольку раздробленное вещество находится всегда в какой-либо среде, свойства его нельзя рассматривать в отрыве от этой среды.

**Мерой дисперсности** могут служить либо поперечник частиц  $a$ , либо обратная ему величина  $1/a = D$  (дисперсность), либо удельная поверхность  $S_{уд} = S_{1,2} / V_1$ , т.е. площадь раздела фаз  $S_{1,2}$ , приходящаяся на единицу объема дисперсной фазы  $V_1$ . Все эти величины взаимосвязаны. Чем меньше размеры частиц, тем больше дисперсность или удельная поверхность.

Понятие дисперсность нецелесообразно распространять на гомогенные (молекулярные) растворы. Понятие дисперсности применимо лишь к крупным (относительно обычных молекул) частицам и макромолекулам. В соответствии с этим все дисперсные системы можно классифицировать следующим образом:

Таблица 15

Классификация дисперсных систем.

Дисперсные системы	Размер частиц или пор, см
Грубодисперсные системы (суспензии, эмульсии)	$10^{-4}$
Системы промежуточной дисперсности (тонкие взвеси, дымы, пористые тела)	$10^{-4} - 10^{-5}$
Высокодисперсные системы (собственно коллоиды)	$10^{-5} - 10^{-7}$

Таким образом, коллоидные системы состоят из двух (или более) фаз: дисперсной фазы (совокупность частиц или пор) и дисперсионной среды, т.е. они являются гетерогенными системами. Таким образом, коллоиды - это не вещества, а гетерогенные системы, содержащие вещества в высокодисперсном состоянии.

#### *Устойчивость и коагуляция коллоидных систем*

Степень раздробления частиц дисперсной фазы оказывает существенное влияние на свойства дисперсных систем. Однако эти свойства определяются не только размером частиц, большое влияние оказывает сама поверхность раздела между составляющими систему фазами и явления на границе частица - среда.

Известно, что всякая поверхность раздела между фазами характеризуется избытком свободной поверхностной энергии ( $F_{1,2}$ ), которая связана с некомпенсированностью межмолекулярных сил в поверхностном слое, поскольку межмолекулярные силы сцепления в граничащих фазах неодинаковы. Свободная поверхностная энергия, отнесенная к единице поверхности, называется удельной свободной поверхностной энергией или поверхностным натяжением ( $\sigma$ ):

$$\sigma = F_{1,2} / S_{1,2} \quad (63)$$

Очевидно, что свободная поверхностная энергия системы ( $F_{1,2}$ ) пропорциональна общей поверхности раздела фаз ( $S_{1,2}$ ):

$$F_{1,2} = \sigma S_{1,2} \quad (64)$$

Поскольку для дисперсных коллоидных систем значение  $S_{1,2}$  очень велико, то  $F_{1,2}$  составляет значительную величину. Согласно второму закону термодинамики при стремлении системы к равновесию:

$$F_{1,2} \rightarrow \min \text{ и } dF = \sigma dS + S d\sigma < 0 \quad (65)$$

Следовательно, к уменьшению свободной поверхностной энергии системы могут вести два пути:

$$1) S_{1,2} = \text{const}, dS_{1,2} = 0, S d\sigma < 0, \sigma \rightarrow \min$$

- самопроизвольное уменьшение поверхностного натяжения,

$$2) \sigma = \text{const}, d\sigma = 0, \sigma dS < 0, S_{1,2} \rightarrow \min$$

- самопроизвольное уменьшение поверхности раздела фаз в системе.

Следовательно, любая коллоидная система термодинамически неустойчива, в ней возможны самопроизвольные процессы, приводящие к уменьшению поверхностного натяжения и суммарной поверхности раздела.

Под устойчивостью дисперсной системы понимают способность дисперсной фазы сохранять состояние равномерного распределения в дисперсионной среде. Н. П. Песков ввел понятия об агрегативной и молекулярно-кинетической устойчивости. Коллоидные системы обладают высокой кинетической устойчивостью. Нарушение их устойчивости происходит, главным образом, вследствие слипания частиц. Слипшиеся частицы образуют рыхлые агрегаты неправильной формы. Процесс образования таких агрегатов носит название коагуляции. Коагуляция может наступить при действии на коллоидную систему таких различных по своей природе факторов, как длительный диализ (очистка золей), добавление неэлектролитов, действие света, встряхивания, но наиболее важным фактором для коагуляции гидрофобных золей является действие электролитов. Коагулирующей частью электролита служит один из его ионов. Коагуляция золей начинается при концентрациях электролитов выше некоторой критической, называемой *порогом коагуляции* (обычно выражается в ммоль/л или мг-экв/л).

Согласно правилу Шульце-Гарди (правило значности), при коагуляции золя электролитами коагулирующий ион имеет заряд, противоположный заряду коллоидной частицы; а порог коагуляции при этом тем меньше, чем выше валентность коагулирующего иона.

Устойчивость золя при концентрации электролита ниже порога коагуляции обусловлена наличием высокого потенциального барьера, препятствующего сближению коллоидных частиц, возникновение которого связано с взаимодействием двойных электрических слоев сближающихся частиц. Увеличение концентрации электролитов выше порога коагуляции

ведет к сжатию двойного электрического слоя, понижению энергетического барьера, препятствующего слипанию частиц при их столкновении, и началу коагуляции.

Весьма своеобразно коагулирующее действие проявляется у органических ионов. Положительно заряженные одновалентные ионы алкалоидов и красителей действуют гораздо сильнее, чем соответствующие им по валентности ионы неорганических электролитов. Это объясняется высокой адсорбционной способностью громоздких органических ионов, обладающих большой поляризуемостью.

В своих исследованиях Гарди полагал, что коагуляция должна наступать в изоэлектрической точке, когда  $\xi$  - потенциал частиц равен нулю. Позднее было установлено, что коагуляция обычно наступает не в изоэлектрической точке, а при достижении некоторого критического  $\xi$  - потенциала. Для многих систем этот потенциал близок к 30 мВ.

К особым явлениям, наблюдающимся при коагуляции электролитами, относятся: так называемое явление неправильных рядов, антагонизм и синергизм ионов при коагуляции, коллоидная защита.

Явление неправильных рядов - это явление наблюдается при введении в коллоидные системы электролитов, содержащих многовалентные ионы с зарядом, противоположным заряду частицы. Оно заключается в том, что при добавлении к отдельным порциям золь различных, все возрастающих количеств электролитов, золь сначала остается устойчивым, затем в определенном интервале концентраций происходит коагуляция, далее золь снова становится устойчивым и, наконец, при высоком содержании электролита опять наступает коагуляция, уже окончательная.

Совместное действие электролитов. При совместном действии коагулирующих ионов могут наблюдаться три эффекта: аддитивность действия, антагонизм и синергизм. Аддитивность обычно проявляют ионы одинакового заряда и близкие по свойствам (например,  $K^+$  и  $Na^+$ ,  $Cl^-$  и  $Br^-$ ). Она характеризуется равенством:

$$C_1 / \gamma_1 + C_2 / \gamma_2 = 1,$$

где  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  - концентрации электролитов и соответствующие им пороговые концентрации.

При *антагонизме* действия электролитов сумма  $C_1 / \gamma_1 + C_2 / \gamma_2$  оказывается больше, чем в случае аддитивности. Иногда явление антагонизма проявляется в такой мере, что в коагулирующей смеси содержание каждого электролита может значительно превышать его собственную пороговую концентрацию. Антагонизм объясняется изменением термодинамической активности ионов при смешении электролитов, взаимодействием между ними с образованием комплексных ионов и адсорбционными эффектами. Антагонизм наблюдается при коагуляции золь  $AgI$  смесями  $Al(NO_3)_3$  и  $K_2SO_4$ ;  $Th(NO_3)_3$  и  $Na_2SO_4$ .

Усиление коагулирующего действия одних электролитов при добавлении других называется *синергизмом*.

*Защита коллоидных частиц.* При введении в золь определенных высокомолекулярных веществ (ВМВ) устойчивость системы может быть значительно повышена. Такое явление получило название *коллоидной защиты*. Веществами, способными обуславливать коллоидную защиту, являются белки, углеводороды, пектины, а для систем с неводной дисперсионной средой – каучук. Для характеристики защитного действия различных ВМВ Зигмонди предложил так называемое "золотое число". Под *золотым числом* подразумевается число миллиграммов ВМВ, которое необходимо добавить к 10 мл красного золя для того, чтобы предотвратить его посинение при введении в систему 1 мл 10-процентного раствора хлорида натрия. Механизм защитного действия сводится к образованию вокруг коллоидной частицы адсорбционной оболочки из высокомолекулярного вещества.

### Методы получения коллоидных растворов

Нетрудно заметить, что грубодисперсные, коллоидно-дисперсные и молекулярно-дисперсные системы связаны между собой взаимными переходами. Из истинного раствора можно получить коллоидную систему, которую затем можно превратить в грубодисперсную систему, и наоборот.

Условием образования коллоидной системы являются нерастворимость (или очень малая растворимость) вещества одной фазы, только между такими веществами могут существовать физические поверхности раздела. Коллоидные системы или золи могут быть получены двумя противоположными методами: методом диспергирования (дробление вещества) и методом конденсации (соединения отдельных молекул или ионов растворенного вещества в агрегаты).

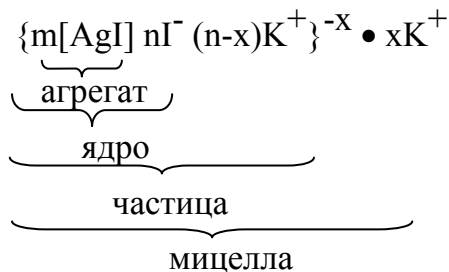
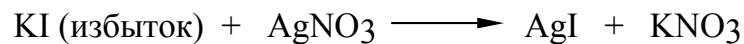
*Методы диспергирования* основаны на механическом дроблении и химическом диспергировании - пептизации. Пептизация - переход в коллоидный раствор свежеполученных осадков, образованных при коагуляции.

*Методы конденсации.* К этой группе методов относится получение золь прямой конденсацией, методом замены растворителя и путем химических реакций. Сущность метода замены растворителя заключается в том, что истинный раствор вещества добавляется к жидкости, смешивающейся с растворителем, но в которой само вещество мало растворимо и выделяется в виде высокодисперсной фазы. Химические методы конденсации основаны на переводе растворенных веществ в нерастворимое состояние при помощи различных химических реакций (восстановление, гидролиз, двойной обмен и др.) с последующей агрегацией и кристаллизацией нерастворимых частиц, образующих дисперсную фазу. Однако, независимо от метода получения относительно устойчивой коллоидной системы, необходимо присутствие в ней стабилизатора. Роль стабилизатора сводится к адсорбции его молекулы или ионов на

поверхности частиц дисперсной фазы и образованию на ней ионно-сольватного или молекулярного сольватированного слоя, препятствующего слипанию частиц.

### Строение коллоидной частицы

Частицы дисперсной фазы в гидрозольях обладают сложной структурой, зависящей от условий получения золь и природы стабилизатора. Например, частицы гидрозоля йодистого серебра, которые получают приливанием раствора азотнокислого серебра к раствору KI (избыток KI - стабилизатор), имеют следующую структуру:



$m$  - число молекул AgI;

$n$  - число избыточных ионов  $\text{I}^-$ , прочно адсорбированных на поверхности агрегата (как правило  $m > n$ ), называемых потенциалообразующими;

$x$  - число ионов, входящих в диффузный слой;

$(n-x)$  - число противоионов  $\text{K}^+$  в адсорбированном слое. Число таких ионов калия  $(n-x)$  - меньше числа адсорбированных ионов йода ( $n$ ), вследствие чего коллоидная частица имеет отрицательный заряд ( $-x$ ).

Частица дисперсной фазы вместе с окружающим ее диффузным слоем называется мицеллой.

На основании экспериментального материала Ф. Панет и К. Фаянс сформулировали правило: на поверхности твердой фазы раствора предпочтительнее адсорбируются ионы способные достраивать кристаллическую решетку данного вещества или образующие с ионами кристаллической решетки труднорастворимые соединения.

Если получать золь йодистого серебра при некотором избытке  $\text{AgNO}_3$ , то частицы золя йодистого серебра приобретают (в отличие от предыдущего случая) положительный заряд.

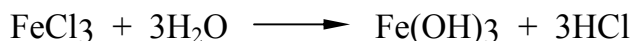
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### *Работа 1. Получение коллоидных растворов различными методами*

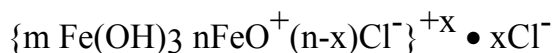
#### *Метод конденсации*

а) Получение коллоидного раствора канифоли методом замещения растворителя. 5 мл 2 % раствора канифоли по каплям приливают к 200 мл дистиллированной воды при энергичном взбалтывании. Полученный молочно-белый золь фильтруют. 50 мл фильтрата нагревают до 70-80°C и наблюдают коагулирующее действие повышенной температуры. Для сравнения результатов быстро приливают спиртовой раствор в воду. Если золь необходимо сохранить длительное время, спирт можно удалить диализом.

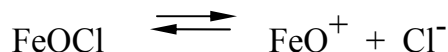
б) Получение золя гидрата окиси железа (III) методом гидролиза. Реакция гидролиза есть частный случай реакции двойного обмена. Золь гидрата окиси железа получается следующим образом: в конической колбе нагревают до кипения 85 мл дистиллированной воды. Не снимая колбы с сетки, удалив лишь пламя горелки, в кипящую воду приливают по каплям 15 мл 4 % раствора хлорного железа. После нескольких минут кипячения в результате гидролиза образуется золь гидроокиси железа красно-коричневого цвета (Fe(OH)<sub>3</sub>):



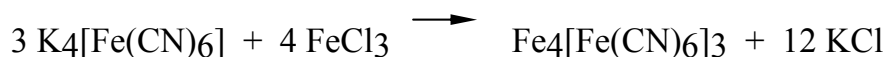
При охлаждении реакция идет в обратную сторону, поэтому полученный гидрозоль, если он подлежит длительному хранению, рекомендуется еще горячим подвергнуть диализу. Строение мицеллы полученного золя можно изобразить следующим образом:



Стабилизатор - продукт неполного гидролиза - хлорокись железа.



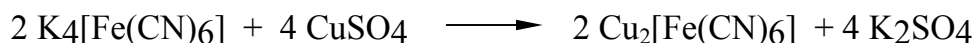
в) Получение золя берлинской лазури. Гидрозоль берлинской лазури Fe<sub>4</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>]<sub>3</sub> получают при смешивании растворов хлорного железа и железисто-синеродистого калия K<sub>4</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>]. Примерные соотношения количеств солей: 100 мл 0,1% K<sub>4</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>] и 2-3 мл 2% раствора FeCl<sub>3</sub>. Образуется отрицательный золь берлинской лазури.





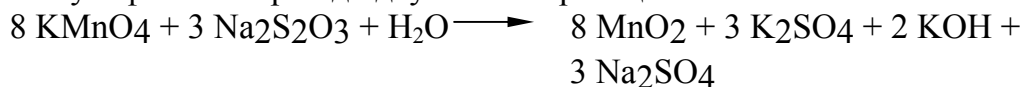
Если вливать  $K_4[Fe(CN)_6]$  в избыток  $FeCl_3$ , то получаются малоустойчивые положительные золи берлинской лазури.

г) Получение гидрозоля железисто-синеродистой меди. К 100 мл 0,1 % раствора  $K_4[Fe(CN)_6]$  прибавляют при взбалтывании 8-10 мл 0,5 % раствора  $CuSO_4$ . Получается очень устойчивый красно-бурый золь.



д) Получение гидрозоля перекиси марганца. К 60 мл 0,3 % раствора  $KMnO_4$  приливают 20 мл 1,5 % раствора  $H_2O_2$ . Приливание ведется медленно при постоянном взбалтывании. Получается коричневый золь перекиси марганца, образовавшийся как результат восстановления части  $KMnO_4$ . На нерастворимой частице  $MnO_2$  адсорбируются ионы  $MnO_4^-$ , определяющие потенциал, в диффузном слое  $K^+$ . Золь заряжен отрицательно.

ж) Получение золя двуокиси марганца. Перманганат калия восстанавливается тиосульфатом натрия до двуокиси марганца.



Потенциалоопределяющие ионы  $MnO_4^-$ , противоионы  $K^+$ . К 1 мл 1,5 % раствора  $KMnO_4$  в пробирке добавляют 10 мл воды. По каплям из пипетки вводят 0,5 мл 1 % раствора тиосульфата натрия.

#### Метод пептизации

а) Получение золя берлинской лазури пептизацией на фильтре. В пробирку пипеткой вводят 1,5 мл насыщенного раствора ферроцианида калия и 0,5 мл 50 % раствора хлорида железа ( $FeCl_3$ ). Полученный осадок переносят на фильтр, промывают водой, заливают на фильтре 2-3 мл 2 % раствора щавелевой кислоты и размешивают стеклянной палочкой. Осадок быстро пептизуется и из фильтра стекает интенсивно окрашенный золь берлинской лазури. Анион  $C_2O_4^{2-}$  сильно адсорбируется на частицах осадка, сообщая им заряд и агрегативную устойчивость.

б) Получение золя  $Fe(OH)_3$  методом пептизации. В 5 мл одномолярного раствора  $FeCl_3$  в колбе на 250 мл добавляют 100 мл воды. Осаждают  $Fe^{3+}$  небольшим избытком раствора аммиака. Колбу заполняют водой доверху и дают осадку отстояться. Осадок многократно декантируют до исчезновения запаха

NH<sub>3</sub>. Объем раствора доводят до 150 мл и добавляют пептизатор - 15-20 капель насыщенного раствора FeCl<sub>3</sub>. Нагревают раствор на водяной бане, взбалтывая. Если осадок остается, то добавляют еще несколько капель пептизатора, продолжая нагревание.

## **Работа 2. Определение порога коагуляции**

Цель работы: определение порога коагуляции зольей различными электролитами.

а) Определение порога коагуляции золя гидроокиси железа. Для работы применяют двумолярный раствор KCl, 0,05 молярный раствор K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0,005 молярный раствор K<sub>3</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>]. В 12 чистых пробирках (по 4 пробирки для каждого электролита) наливают по 5 мл золя гидроокиси железа и указанное в таблице 16 количество миллилитров дистиллированной воды и раствора электролита, после чего содержимое каждой пробирки немедленно хорошо перемешивают и через 30 минут отмечают, в каких пробирках произошла явная коагуляция. (При помутнении поставить в таблице знак "+").

Таким образом, в каждой пробирке концентрация золя одинакова (1:1), а концентрация электролита в каждой следующей пробирке больше, чем в предыдущей, в два раза. Если ни в одной из пробирок коагуляции нет, то повторяют опыт, применяя в 2-5 раз более концентрированный раствор электролита.

Таблица 16

Грубое определение порога коагуляции.

№ пробирки	Золь гидроокиси железа, мл	Дистиллированная вода, мл	Раствор электролита мл	Коагуляция через 30 минут
1	5	4,5	0,5	
2	5	4,0	1,0	
3	5	3,0	2,0	
4	5	1,0	4,0	

Порог коагуляции вычисляют по формуле

$$C_{\text{пор}} = 100 C V \text{ (ммоль/л)}, \quad (66)$$

где C - молярная концентрация; V - наименьшее число миллилитров раствора электролита, достаточное для коагуляции золя.

Например, если коагуляция золя 0.05 М раствором  $K_2SO_4$  произошла только в третьей и четвертой пробирках, то порог коагуляции равен миллимолярной концентрации  $K_2SO_4$  в третьей пробирке, а именно,

$$C_{\text{пор}} = 100 \cdot 0.05 \cdot 2 = 10 \text{ ммоль/л золя}$$

Для получения более точных результатов повторяют определение, применяя промежуточные количества электролита между теми, которые в первой серии вызывали и не вызывали коагуляцию золя (см. таблицу 17).

Таблица 17

Точное определение порога коагуляции.

Первая серия опытов	Вторая серия опытов			
Наименьший объем электролита, вызвавший коагуляцию, мл	Количество раствора электролита в пробирке, мл			
0,5	0,1	0,2	0,3	0,4
1,0	0,6	0,7	0,8	0,9
2,0	1,2	1,4	1,6	1,8
4,0	2,4	2,8	3,2	3,6

В каждую пробирку с золем 5 мл, помимо указанного количества электролита, приливает недостающее до 5 мл количество дистиллированной воды. Значение порога коагуляции записывают в таблицу 18.

б) Определение порога коагуляции золя берлинской лазури и золя двуокиси марганца. Определение порогов коагуляции изучаемых золь производят так же, как и для золя гидроокиси железа (работа № 2а).

В качестве электролитов используют 2 М р-р  $KCl$ , 0,02 М р-р  $MgCl_2$  ( $BaCl_2$ ) и 0,002 М р-р  $AlCl_3$ .

Таблица 18

Порог коагуляции золя с различными электролитами.

Электролит, молярная концентрация	Коагулирующий ион	Порог коагуляции
$KCl$ , 2 М		
$K_2SO_4$ , 0,05 М		
$K_3[Fe(CN)_6]$ , 0,05 М		

## Литература

1. Герасимов Я.И. и др. Курс физической химии: В 2 томах. М., ГосНТИ, хим.литература, 1963, 1969.
2. Ярославцев А.Б. Основы физической химии. М.: Научный мир, 1998.
2. Киреев В.А. Курс физической химии, М.: Химия, 1978.
3. Воробьев Н.К. и др. Практикум по физической химии. М.: Химия, 1975.
4. Практикум по физической химии./ Под ред. проф. С.В. Горбачева. М.: Высшая школа, 1963.
5. Шаталов А.Я., Маршаков И.К. Практикум по физической химии. М.: Высшая школа, 1968.
6. Жук Н.П. Курс коррозии и защиты металлов. М: Металлургия, 1968.
7. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1975.

## Содержание

1. ХИМИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА	3
2. ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВУХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ	23
3. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ	27
4. ТЕОРИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА Э.Д.С.	38
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА МЕТАЛЛА ПО ТОКУ	47
6. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ, УСТОЙЧИВОСТЬ И КОАГУЛЯЦИЯ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ	50